Série E,
N° d'ordre : 47

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

Mlle Jeanne ROESS
Préparateur au Laboratoire de Géophysique
de l'École pratique des Hautes-Études

1re THÈSE. — MESURE DU COEFFICIENT DE RESTITUTION DES ROCHES.

2e THÈSE. — ÉTUDE DES ONDES PROVENANT DE SÉISMES ÉLOIGNÉS.

Soutenues le 6 juillet 1935 devant la Commission d'examen

MM. E. ROTHÉ . . . . . *Président*
J. DE LAPPARENT . .
G. REMPP . . . . . *Examinateurs.*
J. LACOSTE. . . . . .

NOGENT-LE-ROTROU
IMPRIMERIE DAUPELEY-GOUVERNEUR
1935

Série E,
N° d'ordre : 47

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M^lle Jeanne ROESS
Préparateur au Laboratoire de Géophysique
de l'École pratique des Hautes-Études

1re THÈSE. — MESURE DU COEFFICIENT DE RESTITUTION DES ROCHES.

2e THÈSE. — ÉTUDE DES ONDES PROVENANT DE SÉISMES ÉLOIGNÉS.

Soutenues le 6 juillet 1935 devant la Commission d'examen

MM. E. ROTHÉ . . . . . *Président*
J. DE LAPPARENT . . .
G. REMPP . . . . . *Examinateurs.*
J. LACOSTE. . . . . .

NOGENT-LE-ROTROU
IMPRIMERIE DAUPELEY-GOUVERNEUR
1935

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

Doyen..... M. E. ROTHÉ, Professeur de Physique du Globe.

Doyen honoraire. M. E. BATAILLON.

Professeurs honoraires..... MM. E. CHATTON, E. ESCLANGON, M. FRÉCHET, H. GAULT, M. GIGNOUX, L. HACKSPILL, E. DE MARGERIE, G. RIBAUD, E. TOPSENT, H. VILLAT.

	MM.	
Professeurs.....	P. WEISS.....	Physique générale.
	H. OLLIVIER.....	Physique générale.
	C. HOUARD.....	Botanique.
	E. TERROINE.....	Physiologie générale.
	J. DE LAPPARENT..	Minéralogie et Pétrographie.
	R. THIRY.....	Mécanique rationnelle.
	G. CERF.....	Analyse supérieure.
	G. DUBOIS.....	Géologie et Paléontologie.
	P. FLAMANT.....	Calcul différentiel et intégral.
	E. CORNEC.....	Chimie générale.
	A. DANJON.....	Astronomie.
	P. DE BEAUCHAMP.	Zoologie et anatomie comparée.
	L. BOUNOURE.....	Biologie générale.
	R. ROMANN.....	Chimie minérale et Chimie physique.
	G. FOEX.....	Physique expérimentale.
	A. KIRRMANN.....	Chimie organique.
	N.....	Mathématiques générales.
	H. CHERMEZON ...	Botanique.
	G. REMPP.....	Physique du Globe.
	J. LACOSTE.....	Physique du Globe
	H. WEISS.....	Physico-chimie du Pétrole.
	G. HUGEL.....	Chimie du Pétrole.
Maîtres de conférences.....	CH. STAEHLING ...	Chimie appliquée.
	P. SOLEILLET.....	Physique mathématique.
	R. BONNET.....	Physique et Chimie biologiques.
	A. ROUSSEL.....	Mathématiques générales.
	A. CHRÉTIEN.....	Chimie minérale.
	J. MARESQUELLE .	Botanique.
	R. HOVASSE.....	Biologie générale.
	P. A. REMY.....	Zoologie.
	H. CARTAN.....	Mathématiques.
	H. FORESTIER....	Chimie.
	L. NÉEL.....	Physique générale.
	R. HOCART.....	Minéralogie.
	A. WEIL.....	Mathématiques.

Secrétaire..... G. CUVIER.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

A MON MAÎTRE M. E. ROTHÉ

Doyen de la Faculté des Sciences de Strasbourg
Directeur de l'Institut de Physique du Globe
Secrétaire de l'Association Internationale de Séismologie

En témoignage de profonde reconnaissance

Les travaux qui font l'objet de ces deux thèses ont été effectués sous la direction de M. E. Rothé.

C'est pour moi à la fois un devoir et un grand plaisir de lui exprimer ici ma vive reconnaissance pour la bienveillance qu'il m'a toujours témoignée et pour ses conseils éclairés, grâce auxquels j'ai pu entreprendre et terminer ce travail.

Ma gratitude va également à MM. de Lapparent, Rempp et Lacoste, qui ont bien voulu faire partie de mon jury, après m'avoir encouragée de leur aide précieuse au cours de mes travaux.

Je tiens encore à remercier mes collègues de l'Institut et autres amis, qui tous se sont efforcés de me faciliter la tâche, et en particulier M^lle H. Guttenstein, secrétaire du Bureau international de Séismologie, dont la grande expérience m'a été si utile dans la mise au point de l'ouvrage pour l'impression.

MESURE DU COEFFICIENT DE RESTITUTION DES ROCHES

Une bille d'acier tombant sur la face soigneusement polie d'une roche rebondit à une certaine hauteur inférieure à la hauteur de chute. Cette hauteur dite de rebondissement varie suivant la nature de la substance en expérience. Les observations relatives à ces rebondissements de billes sont fort anciennes, car au XV^e^ siècle Léonard de Vinci croyait apercevoir un résultat simple : une bille tombant sur une roche rebondissait au tiers de la hauteur de chute. Beaucoup plus tard, on trouve encore les traces d'observations analogues dans un traité de mécanique élémentaire théorique publié en 1865 par le Père Mancini Nazzareno, professeur au collège de Rome. Plus récemment beaucoup d'auteurs se sont servis de cette méthode pour déterminer soit l'élasticité, soit la dureté des roches ou des métaux ; elle a un caractère pratique, complétant d'autres méthodes d'essai des matériaux de construction. On se reportera avec fruit, dans cet ordre d'idées, aux travaux de Shore (28), Fréminville (9), Brinell et Dillner (3), Brueil (4) et Schneider (27).

La théorie des rebondissements peut se ramener à celle du choc de deux sphères, car la roche peut être assimilée à une sphère de rayon infini : elle a été traitée entre autres par Thomson et Tait (29), puis par P. Appell (2) et par E. Oddone (20). Soient deux corps libres, par exemple deux sphères de masses m et m′, animées au moment du choc de vitesses v

et v' dirigées suivant l'axe joignant les centres de gravité des deux corps, v étant plus grand que v'. Il est possible d'admettre que ces deux sphères forment un système mobile dont le centre de gravité se trouve en un point G. Soit v sa vitesse dirigée suivant l'axe défini plus haut. Cette vitesse v est donnée par l'équation des quantités de mouvement :

$$V(m + m') = mv + m'v' \text{ d'où } V = \frac{mv + m'v'}{m + m'}$$

La vitesse relative du premier corps (m, v) sera, avant le choc :

$$v - V = v' - \frac{mv + m'v'}{m + m'} = \frac{m'(v - v')}{m + m'}$$

Par analogie, celle du second sera

$$v' - V = \frac{m(v' - v)}{m + m'}$$

dirigée en sens inverse de la première.

Dans le cas où les sphères sont parfaitement élastiques elles se sépareront après le choc avec les mêmes vitesses relatives, celles-ci ayant uniquement changé de signe.

Au contraire — et c'est le cas habituel — si elles ne sont pas parfaitement élastiques, leurs vitesses ne seront plus que des fractions des valeurs primitives, égales respectivement à $\frac{m'(v - v')}{m + m'}$ et $\frac{m(v' - v)}{m + m'}$ et dirigées encore dans le sens opposé à la direction incidente. Or dans le cas actuel les deux corps en présence sont, d'une part une petite bille sphérique pesant au maximum 1 gr. 5, d'autre part la roche sous forme d'un parallélépipède dont une face est polie et dont la masse peut atteindre 1 kg. 5 à 2 kg. Ainsi le centre de gravité du système se trouve à l'intérieur du bloc et sa vitesse V est infiniment petite par rapport à v. De plus v', vitesse du bloc, est nul.

La formule $v - V = \frac{m'(v - v')}{m + m'}$ se réduit donc à v, m étant négligeable par rapport à m'.

Soit u la vitesse de la bille après le choc. On aura par conséquent $u = -\varepsilon v$

Si H est la hauteur de laquelle la bille tombe, h celle à laquelle elle remonte après un rebondissement, on peut écrire

$$v^2 = 2gH$$

et

$$u^2 = 2gh$$

d'où

$$\varepsilon = -\sqrt{\frac{h}{H}}$$

ε est une certaine fraction comprise entre 0 et 1 exprimant la quantité d'énergie restituée à la bille par la roche. Ce coefficient caractérisera donc le degré d'élasticité des corps si on se sert toujours de billes identiques. Il permet d'établir un classement par rapport aux propriétés élastiques des différents corps essayés [1] ; Thomson et Tait lui ont donné le nom de coefficient élastique de restitution (29).

La formule $\varepsilon = -\sqrt{\frac{h}{H}}$ fait prévoir immédiatement la méthode expérimentale pour la détermination du coefficient de restitution, puisqu'il suffit d'évaluer h et H. Aussi bien peut-on utiliser indifféremment l'appareil de M. Oddone (20) que j'ai employé pour les mesures, ou ceux de Schneider (27) et de hore (28), qui n'en diffèrent que par la graduation de l'échelle et par le mode de déclenchement de la bille.

L'instrument dont je me suis servie, qui est du même type que celui de M. Oddone, est représenté par la figure 1. Un support de laiton monté sur trois vis calantes est muni à sa partie inférieure d'une pièce en V destinée à porter les substances examinées. Les hauteurs de rebondissement sont évaluées le long d'un tube de verre gradué en millimètres, suffisamment large pour que la bille puisse rebondir sans toucher les parois et mobile en hauteur par glissement dans un cylindre solidaire du support.

1. Cette classification est si apparente qu'on peut dans un cours montrer aux auditeurs la différence des propriétés élastiques, comme le fait M. Rothé dans son enseignement de séismologie.

Afin que la bille puisse tomber sans vitesse initiale et ne reçoive aucune impulsion, le tube porte à sa partie supérieure un dispositif représenté en projection horizontale sur la figure 2. Ce dispositif comprend trois tiges (t) appuyées au moyen de petits ressorts (r) à des cames (c) fixées sur un disque mobile autour d'un axe vertical. Quand on fait tourner ce disque dans le sens de la flèche, les ressorts (r) sont comprimés et les tiges poussées vers le centre de l'ouverture. A un certain moment, la languette évidée (l) s'engage dans une pointe (p) solidaire d'un déclencheur mécanique. Les tiges (t) sont alors suffisamment rapprochées pour maintenir la bille. Quand en pressant sur le déclencheur B, on comprime le ressort (r'), celui-ci entraîne la pointe (p) ; la languette (l), qui n'est plus retenue, revient en arrière sous l'influence du ressort R, tandis que les trois petits ressorts (r) obligent les tiges à reprendre la position primitive. La bille tombe ainsi sans vitesse initiale et sans mouvement de rotation.

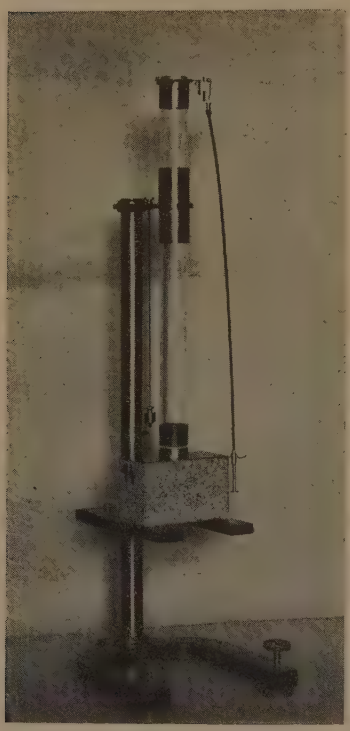


Fig. 1.

Il est possible d'exprimer le phénomène de restitution de différentes manières. Fréminville l'indique en fractions de hauteurs de chute, ou par $\varepsilon^2 = \frac{h}{H}$; l'appareil de Shore porte des graduations arbitraires. Le degré d'élasticité d'un corps est ainsi représenté par le chiffre qu'atteint la bille lors de

son rebondissement. Il semble cependant plus simple d'adop-

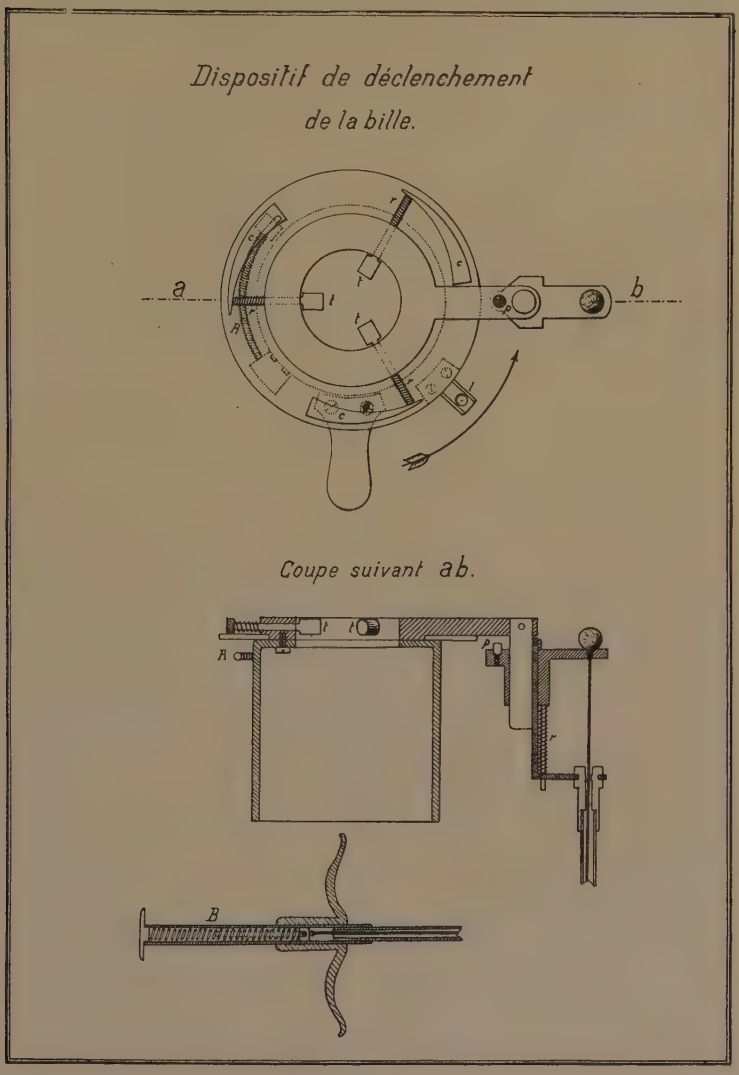


Fig. 2.

ter la forme indiquée par M. Oddone (20), qui est basée sur les changements de vitesse.

Ce coefficient de restitution est évidemment une valeur

complexe faisant intervenir à la fois les propriétés élastiques de la bille et celles de la roche. La diminution de la vitesse doit être attribuée à plusieurs causes :

1° Une partie, très faible sans doute, de l'énergie cinétique se transforme en chaleur au moment du choc.

2° La bille et le bloc sont chacun mis en vibration, comme me l'a fait remarquer M. Thiry, directeur de l'Institut des sciences mathématiques. Ce phénomène qui a peu d'importance pour de grandes hauteurs de chute en a certainement davantage quand il s'agit de hauteurs faibles. C'est probablement aussi à ce fait que sont dues les variations du nombre trouvé pour ε quand on opère sur deux échantillons de la même roche ayant des épaisseurs nettement différentes.

3° La part la plus importante revient évidemment aux propriétés élastiques de la roche.

4° La résistance de l'air peut être cause d'une légère erreur qu'il est possible de déterminer par le calcul.

Cette résistance s'exprime en fonction de la vitesse de chute par la formule $R = mg\,\varphi(v)$, $\varphi(v)$ étant une fonction positive et croissante de v. $\varphi(v)$ est de la forme $K.\,v^n$ et, en général, égal à $K\,v^2$.

Pour le mouvement de chute, l'équation est la suivante :

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = -(g - K\,v^2) \qquad (1)$$

le sens positif étant dirigé de bas en haut.

Après le choc $\gamma = -(g + K\,v^2)$

En intégrant l'équation différentielle (1), on arriverait à la formule :

$$v = -\sqrt{\frac{g}{K}} \cdot \frac{e^{2t\sqrt{Kg}} - 1}{e^{2t\sqrt{Kg}} + 1}$$

Comme il suffit ici d'avoir une limite supérieure de l'erreur commise, on peut procéder d'une manière plus simple. La bille remontant à une hauteur h, on a $u^2 = 2\,\gamma\,h$.

On aura $2\,gh' = 2h\gamma = 2\,(g + Ku^2)\,h$

$$h' = \frac{g + Ku^2}{g}\,h = \left(1 + \frac{K}{g}\,u^2\right)h$$

Or, $K = 5.\ 10^{-10}$ pour les surfaces sphériques, donc

$$h' = \left(1 + \frac{5}{10 + 10g} \cdot u^2\right) h$$

On voit que l'erreur est très petite par rapport à celles qui sont dues à la mesure de h.

Erreur commise sur ε :

$$\varepsilon = -\sqrt{\frac{h}{H}} \qquad \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{2}\frac{dh}{h}$$

Dans toutes les expériences, H = 460 mm.

Pour les roches très élastiques dans lesquelles ε oscille autour de 0,9, h est compris entre 380 et 420 mm.

dh = 2 à 3 mm., mais comme chaque valeur de h est le résultat d'une vingtaine de mesures, dh est plus petit que 2 mm.

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} < \frac{1}{2} \cdot \frac{0,2}{40} \quad d\varepsilon < \frac{0,9}{400} \quad d\varepsilon < 0,002$$

Pour les roches moins élastiques, $h < 280$ mm., $\varepsilon < 0,8$

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} < \frac{1}{2} \cdot \frac{0,2}{28} \quad \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} < \frac{1}{280} \quad d\varepsilon < \frac{0,8}{280} \quad d\varepsilon < 0,003$$

Théoriquement les erreurs expérimentales ne peuvent donc influencer que la troisième décimale. Pour des matières constituées par des cristaux de composition et d'orientation diverses cette décimale est assez illusoire parce que l'on observe dans les essais successifs des divergences tenant à l'hétérogénéité de la roche.

J'ai également déterminé le module d'Young des roches par la méthode de l'empreinte que préconise M. Oddone (20) : lorsque l'on fait tomber une bille d'acier sur la surface légèrement enfumée d'une roche, elle y laisse une empreinte circulaire. Si l'on désigne par

a le rayon de cette empreinte,

E le module d'Young de l'acier pris égal à 22.10^{11}, valeur trouvée dans le « Recueil des Constantes Physiques » (21) pour l'acier trempé,

E_1 celui de la roche,
m la masse de la bille,
R son rayon,
H la hauteur de laquelle elle tombe,
g l'accélération de la pesanteur,
on peut démontrer la relation suivante :

$$\frac{1}{E} + \frac{1}{E_1} = \frac{16\ a^5}{13{,}5\ .\ m\ .\ 2g\ H\ .\ R^2}$$

L'établissement de cette formule se trouve dans les travaux de Hertz (10) et dans l'ouvrage de M. Oddone (20). Un certain nombre des échantillons d'essai avaient déjà été étudiés à Strasbourg par M. Castan (6). Je me suis servie des résultats qu'il a publiés, sans déterminer ε à nouveau pour les roches qui avaient fait l'objet de son travail [1]. J'ai étendu celui-ci à d'autres échantillons de roches qui ont été soit recueillis sur le terrain, soit empruntés à la collection de l'Institut de Physique du Globe, soit aimablement offerts par plusieurs propriétaires de carrières [2]. Comme les précédents, ils ont été taillés et polis par la taillerie « Le Granit d'Alsace » à Eichhoffen, à qui j'adresse l'expression de ma gratitude.

Dans le tableau suivant, j'ai classé les différentes roches mises à l'essai par rapport aux coefficients de restitution décroissants (en valeur absolue, ε étant par définition une fraction négative) [3]. La deuxième colonne contient les valeurs de E trouvées pour ces mêmes roches.

1. Dans la suite, les valeurs de E publiées par M. Castan seront imprimées en italiques, celles que j'ai obtenues figurant en caractères ordinaires.

2. Le Granit d'Alsace, Eichhoffen ; Société des Carrières de Saint-Nabor, 9, place Kléber, Strasbourg ; Société des Grandes Carrières des Vosges « Socarvo », 3, quai Zorn, Strasbourg ; Société strasbourgeoise des Asphaltes et Bitumes, propriétaire de la mine d'Asphalte de Lobsann, 4, rue du Bassin-de-l'Industrie, Strasbourg ; Société des Carrières de trapp et de granite, Raon-l'Étape (Vosges) ; Le Terrazzo des Vosges, rue de La Fayette, 11, Strasbourg-Meinau ; Marbrerie de la Schachenmühle, 2, rue Schachen, Strasbourg-Neudorf.

3. Pour simplifier les notations, j'ai donné la valeur absolue de ε dans toutes les mesures, en ne tenant pas compte du signe.

Classement des roches d'après les valeurs décroissantes du coefficient de restitution[1]

N°	Roches	Coefficient de restitution ε	Module de Young E
1 *a*	Trapp de Raon-l'Étape	0,961*	*6,44.* 10^{11}*
1 *b*	— 2e échantillon	0,944	—
2	Dacitoïde de Saint-Nabor	0,958* 0,941	7,2. »* 4,66. »
3	Andésite de Schwarzbach	0,958*	7,0. »*
4	Dacite de Saint-Nabor	0,955*	6,3. »*
5	Andésite de Saint-Nabor	0,953*	6,0. »*
6	Rhyolite d'Eftermatten	0,953*	5,9. »*
7 *a*	Basalte de Riquewihr	0,949*	6,5. »*
7 *b*	»	0,928	6,0. »
8	Gabbro à olivine de Suède	0,948 0,932	12,2. » 6,6. »
9	Kersantite du Rosskopf	0,942 0,916	5,1. »
10	Monzonite du Hohwald	0,934-0,956	4,8-9,8. »
11	Ophite de Dax	0,933	9,6. »
12	Granite de Kruth	mica : 0,842 val. moyenne : 0,913-0,923 F. 0,939	val. moyenne : 6,2. » Q. 10,7. »
13	Gran. d'Andlau « Rose de France »	F. orthose : 0,935 mica : 0,880 val. moyenne : 0,826-0,949	F. 5,2. » Q. 10,7. »
14	Gran. d'Andlau « Feuille morte »	F. orthose : 0,938 F. calco-sodique : 0,934 valeur moyenne : 0,927	F. 7,1. » Q. 12,8. »
15	Granite de Raon-l'Étape	0,937	F. *6,05.* » Q. *8,26.* »
16	Granite du Felsberg (Allemagne)	F. 0,934 valeur moyenne : 0,874	F. 7,5. » 4,2. »
17	Gabbro de Suède	0,890 0,930	6,2-9,5. »
18	Granite de Cornimont	F. 0,930 valeur moyenne : 0,913	*5,99.* »
19	Rhyolite du Rosskopf	0,932	8,0. »

1. Tous les cas où ε et E ont été trouvés constants pour tous les points frappés sont indiqués par un astérisque (*).

N°	Roches	Coefficient de restitution ε	Module de Young E
20 *a*	Trapp de Netzenbach	0,928*	*5,68.* 10^{11}
20 *b*	»	0,914	3,8. »
21	Quartzite de Voegtlinshoffen	0,922 (0,890-0,950)	4,8. » (4,2-5,9). »
22	Minette de Saint-Nabor	0,911 (0,847-0,949)	3,5. » (2,3-4,7). »
23	Rhyolite du Neuntenstein	0,909	6,2. »
24	Rhyolite du Rosskopf	0,897	—
25	Porphyre de Saint-Michel	0,894	*15,82.* »
26	Diorite du Neuntenstein	0,892	6,3-11,5. »?
27	Schiste calcareux à radiolaires de Schirmeck	0,883*	3,5 »*
28	Marbre de Hauteville (Ain)	0,869*	*3,33.* »*
29	Tuf dacitique de Saint-Nabor	0,867 0,850-0,881*	2,5*-3,8. »
30	Marbre Napoléon « Grand mélange » (Hydrequent)	0,861*	*3,3.* »
31	Marbre tigré « Pattes d'Alouettes » (Hydrequent)	0,845* calcite : 0,786	2,8. »* 2,14. »
32	Marbre « Granite belge »	0,844*	3,5. »*
33	Granite du Kagenfels	0,837	F. *7,18.* » Q. *10,5.* »
34	Cipolin à phlogopites de Sainte-Marie-aux-Mines	calcaire : 0,836 forstérite : 0,844 mica phlogopite : 0,807	3,4. » 5,0. » 1,5. »
35	Grès argilo-micacé de Ribeauvillé	0,827*	1,5. »
36	Lunel Rubané « Notre-Dame » (Hydrequent)	0,777 0,821	—
37	Cipolin blanc de Sainte-Croix-aux-Mines	0,763*	1,9. »*
38	Marbre de Seravezza	0,757	*2,23.* »
39	Marbre blanc d'Italie	0,707	*2,78.* »
40	Calcaire oolithique à dendrites de Rosheim	calcaire : 0,666 dendrites : 0,707	0,50. » 0,92. »
41	Asphalte de Lobsann (F. = feldspath, Q. = quartz)	0,349	—

RÉSULTATS

Le classement des roches d'après leur coefficient de restitution présente certaines difficultés. Pour les substances homogènes, à grain très fin, on mesure une valeur moyenne qui caractérise bien la roche. Au contraire pour des matières telles que le granite, les chiffres varient dans de larges limites suivant que le rebondissement a eu lieu sur l'un ou sur l'autre des minéraux qui le composent. L'interprétation des résultats est d'autant plus difficile qu'on ne connaît pas la composition exacte de la roche au point d'impact. Prenons par exemple un cristal de feldspath sur lequel rebondit la bille : il se peut que celui-ci soit de grandes dimensions dans toutes les directions. S'il en est ainsi, le coefficient ε mesuré caractérisera surtout le feldspath lui-même. Il se peut aussi que ce que l'on voit à la surface ne soit au contraire qu'une mince lamelle de feldspath, qui se continue immédiatement au-dessous du point de contact par un autre minéral : dans ce dernier cas, la mesure ne représentera plus qu'une moyenne. Enfin, un troisième cas possible est celui où la bille frappe une ligne de séparation entre deux minéraux : ici aussi nous arriverons évidemment à une moyenne.

Il résulte de ce qui précède qu'il convient de faire un classement à part pour les roches homogènes grenues et pour celles à éléments de dimensions plus importantes.

J'ai eu la bonne fortune d'être conseillée pour l'étude pétrographique de mes échantillons par le P. Henry Derville, docteur ès sciences, assistant délégué à la Faculté des sciences de Strasbourg. Il a même eu la bonté de procéder à l'examen en lame mince d'un certain nombre de roches[1]. Je tiens à lui exprimer ici ma reconnaissance. La diagnose qu'il a eu l'obligeance de me donner a été reproduite en italiques dans chaque cas particulier.

1. Les échantillons 2, 3, 4, 5, 7 *a*, 8, 9, 11, 17, 19, 26, 27, 29, 35, ont été étudiés en lame mince.

Grâce à l'amabilité de M. Lacroix, secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, les lames ont pu être taillées au Laboratoire de Minéralogie du Museum par M. Lambaré.

1. *a)* Trapp de Raon-l'Étape (carrières de trapp et de granite).

« Porphyrite à ouralite. » Pour Vélain, c'est une roche éruptive qu'il compare aux diabases de la vallée de la Bruche ; A. Michel-Lévy et H. Termier (16) croient qu'elle résulte d'un métamorphisme par le granite de sédiments marneux et calcaires. C'est la roche qui a le plus grand coefficient ε mesuré. Pour pouvoir faire cette mesure, j'ai été obligée d'augmenter de plus en plus la hauteur de chute de la bille depuis 458 mm. jusqu'à 558 mm. ; ε est resté constant. Trois séries d'expériences ont donné :

$\varepsilon = 0{,}961 — 0{,}962 — 0{,}960$, donc en moyenne $\varepsilon = 0{,}961$.

$E = 6{,}44 \cdot 10^{11}$, chiffre beaucoup plus petit que ceux donnés par M. Oddone (20) pour des roches ayant le même coefficient de restitution.

b) Deuxième échantillon de trapp de Raon.

Il provient de la même carrière, mais il est poli sur six faces [1]. On y aperçoit des veines de différentes couleurs allant du vert clair au vert foncé presque noir. Toutes les faces ont été soumises à l'essai.

1° Face d'aspect uniformément vert foncé où l'on ne voit pas de veines : $\varepsilon = 0{,}945$.

2° Face coupée perpendiculairement aux veines alternativement claires ($\varepsilon = 0{,}945$) et foncées ($\varepsilon = 0{,}945$).

3° Face coupée perpendiculairement aux veines foncées : $\varepsilon = 0{,}948$.

4° Face analogue à 3° : $\varepsilon = 0{,}944$.

1. Cet échantillon est un presse-papier offert à M. Rothé par le Directeur des carrières ; il a été taillé dans un banc choisi spécialement.

5° Face de couleur vert clair taillée parallèlement aux veines : $\varepsilon = 0{,}946$.

6° Face de couleur vert foncé taillée parallèlement aux veines : $\varepsilon = 0{,}944$. En moyenne : $\varepsilon = 0{,}945$.

Il ne semble pas que la constitution varie d'une manière appréciable selon les endroits.

Un cas particulier se présente : sur l'une des faces, une enclave à reflets métalliques est visible. ε n'atteint plus que 0,865. Pour E, on trouve les mêmes variations : M. Castan, après avoir obtenu $8{,}36 \cdot 10^{11}$ sur la roche, ne trouve plus que $6{,}30 \cdot 10^{11}$ sur l'enclave. D'une manière générale, on constate que cet échantillon donne des valeurs plus faibles pour ε que le premier.

2. Dacitoïde de Saint-Nabor (carrières de Saint-Nabor).

« *Roche de la famille des dacites, mais sans phénocristaux de quartz et sans paillettes de mica noir.* » Pour mesurer ε, j'ai dû augmenter la hauteur de chute de 460 mm. à 520 mm. Les chiffres obtenus sont très constants et conduisent à $\varepsilon = 0{,}958$. A la surface de la roche, une enclave est visible, ε a également été mesuré. Le résultat est plus faible : $\varepsilon = 0{,}941$. Pour E, on constate la même variation. Sur la masse, on trouve les valeurs suivantes :

$$E = \frac{6{,}5 + 7{,}2 + 7{,}9}{3} \cdot 10^{11} = 7{,}2 \cdot 10^{11}$$

tandis que sur l'enclave

$$E = \frac{5{,}2 + 4{,}2\ 4{,}6 +}{3} \cdot 10^{11} = 4{,}7 \cdot 10^{11}.$$

3. Andésite de Schwarzbach (carrières de la « Socarvo »).

« *Andésite à épidote. La pâte est composée de microlithes de feldspaths calco-sodiques et de paillettes d'actinote, ces der-*

nières formées aux dépens d'un pyroxène primitif disparu. » Elle est de structure homogène, ce qui fait prévoir des valeurs constantes pour ε et pour E. Pour obtenir ε j'ai été obligée d'augmenter la hauteur de chute jusqu'à 580 mm. ; il a subi de très faibles variations et on a ε = 0,958 :

$$E = \frac{7,2 + 7,1 + 6,8 + 7,0}{4} \cdot 10^{11} = 7,0 \cdot 10^{11}$$

Une seule valeur faible pour E en un point : $E = 5,5 \cdot 10^{11}$.

4. Dacite de Saint-Nabor (même carrière que la dacitoïde).

« *Sur un fond finement cristallisé de quartz et de feldspaths calco-sodiques ressortent des cristaux de quartz, d'orthose, de feldspaths calco-sodiques et des paillettes de mica. Les quartz sont corrodés ; de l'épidote s'est formé aux dépens des feldspaths calco-sodiques et du mica biotite. Ce dernier a exsudé son fer.* » La composition étant sensiblement la même que celle de la dacitoïde, il faut s'attendre à des résultats analogues. Pour H = 520 mm., on trouve ε = 0,955 (0,958 pour la dacitoïde).

Pour E, les valeurs sont moins constantes. Deux chiffres seuls sont comparables à ceux de la dacitoïde, $8,2 \cdot 10^{11}$ et $6,5 \cdot 10^{11}$, en moyenne $7,3 \cdot 10^{11}$. Les autres correspondent à ceux trouvés pour l'enclave :

$$E = \frac{5,0 + 3,8 + 5,5}{3} \cdot 10^{11} = 4,7 \cdot 10^{11}$$

5. Andésite de Saint-Nabor (provient encore des mêmes carrières que la précédente).

« *Roche volcanique à deux temps de consolidation, montrant des phénocristaux de labrador, de hornblende, des cristaux de biotite avec formation de chlorite, le tout dans une pâte constituée par un mélange de microlithes de feldspaths calco-sodiques et d'une matière jaune verdâtre de nature serpentineuse. On pourrait peut-être la classer parmi les tufs* » : l'examen en

lame mince montre qu'on peut l'appeler indifféremment par suite de la nature des feldspaths soit andésite, soit labradorite à amphibole. Les valeurs trouvées pour h conduisent à $\varepsilon = 0{,}953$. Pour certaines mesures isolées, ε monte jusqu'à 0,966. E est assez difficile à mesurer et les résultats sont peu sûrs, car les empreintes ne sont pas circulaires mais légèrement allongées. On obtient les valeurs suivantes : $5{,}4 \cdot 10^{11}$, $6{,}3 \cdot 10^{11}$, $6{,}2 \cdot 10^{11}$, donc en moyenne $6{,}0 \cdot 10$. La valeur exceptionnelle $E = 9{,}8 \cdot 10^{11}$ qu'on trouve aussi correspond probablement à $\varepsilon = 0{,}966$, mais l'aspect de l'empreinte ne diffère guère de celui des empreintes habituelles.

6. Rhyolite de la carrière d'Eftermatten (collection de l'Institut).

« Roche éruptive. De grands cristaux de feldspaths et de quartz, apparaissant à l'œil nu (phénocristaux, du grec *phainein*, apparaître), se distinguent dans une pâte rose. L'échantillon ne possède cependant pas les lignes de coulée caractéristiques pour cette carrière » : $\varepsilon = 0{,}953$. Pour E on trouve des différences suivant les points frappés. Les chiffres augmentent quand la bille tombe sur un cristal. Les empreintes sur la pâte donnent

$$E = \frac{5{,}3 + 4{,}6 + 5{,}3}{3} \cdot 10^{11} = 5{,}1 \cdot 10^{11},$$

sur les cristaux

$$E = \frac{7{,}4 + 6{,}9}{2} \cdot 10^{11} = 7{,}2 \cdot 10^{11}.$$

En ce qui concerne le nombre total des rebondissements, cette rhyolite se rapproche beaucoup du trapp de Netzenbach.

7. Basalte de Riquewihr, deux échantillons (collection de l'Institut).

a) « *Augitite à olivine (à rapprocher des Limburgites).*

Roche volcanique à cristaux d'augite et d'olivine noyés dans une pâte formée d'augite en microlithes et de fer en petits granules. Les phénocristaux d'augite sont zonaires ; certains cristaux d'olivine sont transformés en bastite, d'autres en produits ferrugineux. La roche montre, en outre, des soufflures et des enclaves de quartz. Les soufflures sont remplies de calcite avec formation de sidérose en bordure. Les enclaves de quartz sont auréolées d'augite ; cette auréole est due à la réaction du magma sur l'enclave. »

Ce basalte a d'ailleurs été décrit par Link (14) dans *Die Basalte des Elsass.* Il faut s'attendre à trouver des chiffres très variables lorsque la bille tombe sur les nombreux cristaux d'augite ou d'olivine. Les empreintes se distinguent fort mal par suite de la couleur foncée de la roche. Pour ε, on trouve en moyenne 0,949, il varie entre 0,938 et 0,955. E, au contraire, est sujet à de larges variations. Il semble qu'il y ait trois séries de résultats :

$$1)\quad E_1 = \frac{6{,}6 + 7{,}5 + 5{,}5}{3} \cdot 10^{11} = 6{,}5 \cdot 10^{11}$$

$$2)\quad E_2 = \frac{14{,}1 + 12{,}9 + 11{,}9}{3} \cdot 10^{11} = 12{,}9 \cdot 10^{11}$$

$$3)\quad E_3 = \frac{21{,}0 + 21{,}8}{2} \cdot 10^{11} = 21{,}4 \cdot 10^{11}$$

Il est probable que les chiffres exceptionnellement grands pour E ont été obtenus en des points où la roche renfermait de la magnétite (invisible à la surface) ou sur un cristal d'olivine (cf. gabbro à olivine de Suède).

b) Pour le deuxième échantillon, la valeur $\varepsilon = 0{,}928$ trouvée est plus faible. Ceci peut être dû en partie au fait qu'il est moins épais que le premier. Pour E également, les valeurs trouvées sont plus petites, on obtient une série de chiffres correspondant à la série 1 de l'échantillon précédent :

$$E = \frac{6{,}5 + 7{,}2 + 5{,}7}{3} \cdot 10^{11} = 6{,}4 \cdot 10^{11}$$

En outre, des valeurs notablement plus petites ont été obtenues :

$$E = 4{,}7 \cdot 10^{11}, 3{,}9 \cdot 10^{11}, 2{,}1 \cdot 10^{11}$$

Il se peut que les grandes divergences trouvées pour ces deux échantillons doivent être attribuées à la présence de soufflures, celles-ci ayant une action importante d'après plusieurs auteurs (9, 23) sur la valeur de E.

8. Gabbro a olivine (provenant des carrières de la Maison Fernströms a Carlsham (Suède) et aimablement offert à l'Institut par la taillerie « Le Granit d'Alsace » a Eichhoffen) :

« *Roche holocristalline; les éléments blancs sont des feldspaths calco-sodiques du type Labrador. Les éléments colorés sont représentés par l'olivine, l'augite, l'hypersthène et le mica noir* » : pour h, deux séries de chiffres ont été obtenues qui conduisent d'ailleurs à des valeurs de ε assez rapprochées : 0,948 et 0,932. On observe également plusieurs séries de chiffres pour E. Les empreintes sur le noir de fumée sont très nettes. Elles ont la particularité suivante : les empreintes totales de la bille (anneau extérieur + tache circulaire) sont très grandes ; l'anneau extérieur, qui d'après E. Oddone et Hertz représente la partie dilatée de la roche, atteint un rayon de 140 microns, valeur maximum trouvée. La largeur de cet anneau ne dépend pas uniquement de l'épaisseur de la couche de noir de fumée, car j'avais à dessein enfumé la surface d'une manière irrégulière. Les valeurs trouvées pour E sont les suivantes :

1) $E_1 = 3{,}6 \cdot 10^{11}$ (une seule observation)

2) $E_2 = \frac{6{,}4 + 6{,}2 + 7{,}1 + 6{,}9}{4} \cdot 10^{11} = 6{,}6 \cdot 10^{11}$

3) $E_3 = \frac{11{,}4 + 13{,}1}{2} \cdot 10^{11} = 12{,}2 \cdot 10^{11}$

4) $E_4 = 22{,}9 \cdot 10^{11}$ (sur un cristal d'olivine)

9. Kersantite quartzifère du Rosskopf (collection de l'Institut).

« *Roche franchement porphyrique composée de feldspaths calco-sodiques, d'amphibole, de mica noir et de quartz qui moule le tout; un peu de sphène* » : les hauteurs de rebondissement sont différentes suivant les points frappés ; $0{,}916 < \varepsilon < 0{,}942$. De même pour E. L'échantillon n'est pas très bien poli et les empreintes obtenues à l'aide des billes habituelles ($m = 1$ gr. 4 et $r = 0{,}35$ cm.) sont trop irrégulières pour permettre des mesures précises. Je me suis servie d'une bille de dimensions plus petites ($m = 0{,}250$ gr. et $r = 0{,}197$ cm.) ; les erreurs relatives dans ce cas sont évidemment beaucoup plus grandes, car les mesures portent sur des valeurs plus faibles :

$$E = \frac{4{,}7 + 6{,}0 + 4{,}9 + 5{,}4 + 4{,}5}{5} \cdot 10^{11} = 5{,}1 \cdot 10^{11}$$

Deux valeurs exceptionnelles : $E_1 = 2{,}6 \cdot 10^{11}$ et $E_2 = 21{,}0 \cdot 10^{11}$?

10. Monzonite recueillie sur le terrain près du Neuntenstein (collection de l'Institut).

« Se rapproche des diorites quartzifères, mais contient beaucoup plus de feldspaths alcalins » : deux échantillons ont été taillés dans le même bloc ; l'un est traversé par un filon d'éléments ferro-magnésiens. Au voisinage de ce filon, les feldspaths sont teintés en vert.

1° sur les feldspaths blancs :

$$\varepsilon = 0{,}934 \quad E = \frac{6{,}3 + 6{,}3 + 6{,}3 + 6{,}3}{4} \cdot 10^{11} = 6{,}3 \cdot 10^{11},$$

E reste exceptionnellement constant.

2° sur les feldspaths teintés en vert :

$$\varepsilon = 0{,}953 \quad E = \frac{5{,}8 + 7{,}1}{2} \cdot 10^{11} = 6{,}4 \cdot 10^{11}$$

3° valeur moyenne sur la pâte :

$$\varepsilon = 0{,}955 \quad E = \frac{5{,}2 + 3{,}7 + 5{,}3}{3} \cdot 10^{11} = 4{,}7 \cdot 10^{11}$$

4° sur le filon :

Il ne semble pas que celui-ci soit de composition constante. Il n'a pas la même largeur sur toute sa longueur ; là où il se rétrécit, on trouve des valeurs beaucoup plus grandes aussi bien pour ε que pour E.

a) $$\varepsilon = 0{,}934 \quad E = \frac{4{,}8 + 4{,}8}{2} \cdot 10^{11} = 4{,}8 \cdot 10^{11}$$

b) $$\varepsilon = 0{,}956 \quad E = \frac{9{,}7 + 9{,}7 + 10{,}2 + 10{,}2 + 9{,}6 + 7{,}9}{6} \cdot 10^{11} = 9{,}5 \cdot 10^{11}$$

11. Ophite de Dax (collection de l'Institut).

« *Roche à deux temps de cristallisation montrant des phénocristaux d'augite, d'épidote et d'actinote accompagnés de chlorite dans une pâte microlithique formée de feldspaths calco-sodiques plus ou moins altérés et transformés en séricite. Il y a un peu d'olivine dans la pâte finement cristallisée qui constitue le fond de la roche. Un peu de quartz secondaire.* »

Les empreintes sont très peu visibles, car la roche est foncée et le noir de fumée s'en distingue mal. Les valeurs trouvées pour ε et E sont relativement constantes :

$$\varepsilon = 0{,}933 \quad E = \frac{9{,}4 + 10{,}1 + 8{,}4 + 10{,}4}{4} \cdot 10^{11} = 9{,}6 \cdot 10^{11}$$

mais E est exceptionnellement grand par rapport à ε.

12. Granite gris-bleu de Kruth (Le Granit d'Alsace).

« Contient de grands cristaux de feldspaths » : pour cette roche, ainsi que pour toute la série des granites étudiés, les chiffres sont très variables suivant les points d'impact. On a des valeurs différentes pour les feldspaths et les quartz qui se trouvent dans certains échantillons sous forme de grands

cristaux, car il ne s'agit pas d'un feldspath unique de formule bien définie mais d'une matière variable suivant l'origine des roches. La composition chimique a une influence certaine sur le chiffre du coefficient d'élasticité, influence qui a d'ailleurs été mise en évidence par Adams et Coker (1). On ne pourra donc s'attendre qu'à des valeurs moyennes. De plus, pour un granite donné et pour un minéral donné de celui-ci, on ne peut pas davantage espérer obtenir des chiffres constants, car on ne connaît pas la composition précise de la partie de la roche correspondant au point où se fait le rebondissement. Comme je l'ai dit plus haut, tel cristal de feldspath a peut-être été usé par le polissage et ne forme plus qu'une mince lamelle continuée en profondeur par un autre minéral dont les propriétés élastiques sont tout à fait différentes. Lorsque les éléments sont grenus, ce fait a moins d'importance ; on ne trouve qu'une moyenne, mais cette moyenne caractérise l'ensemble de la roche. On n'y constate pas les grandes variations provenant de ce qu'un élément particulier de la roche a pu avoir un effet prépondérant en un point donné.

En vue d'obtenir un chiffre moyen pour ε, j'ai fait des mesures suivant une droite parallèle à l'un des bords en déplaçant la roche d'une très petite quantité après chaque mesure ; les chiffres sont très variables, en moyenne $\varepsilon = 0{,}879$. On peut cependant en déduire les valeurs suivantes :

1° Sur le feldspath : $\varepsilon = 0{,}939$. $E = 7{,}6 \cdot 10^{11}$.

2° Sur le mica : $\varepsilon = 0{,}842$.

3° Mélange mica-feldspath : $\varepsilon = 0{,}913$.

Pour un mélange de quartz et de mica : $E = 5{,}4 \cdot 10^{11}$.

Quand la proportion de quartz augmente : $E = 6{,}4 \cdot 10^{11}$.

Pour un crista de quartz isolé : $E = 10{,}7 \cdot 10^{11}$.

13. Granite d'Andlau, variété « Rose de France », carrière du Rebstall, située sur le flanc du Rosskopf (Le Granit d'Alsace).

« Belle roche de structure porphyroïdique de couleur rouge

brun. Elle contient de gros cristaux de feldspath orthose, le plagioclase aussi y est développé en assez gros éléments » : sa composition chimique et minéralogique a été donnée par Rosenbusch (24).

Les essais ont été faits sur deux échantillons de différentes épaisseurs :

1° Épaisseur : 8 cm. En moyenne $\varepsilon = 0{,}915$.

Sur le feldspath orthose :

$$\left.\begin{array}{l}\varepsilon = 0{,}938\\ \varepsilon = 0{,}932\end{array}\right\} 0{,}935$$

$$E = \frac{4{,}5 + 5{,}9 + 4{,}3 + 6{,}3}{4} \cdot 10^{11} = 5{,}2 \cdot 10^{11}$$

Sur le mica :

$$\varepsilon = 0{,}880$$

Pour le quartz :

$$E = \frac{9{,}7 + 7{,}8 + 13{,}3}{3} \cdot 10^{11} = 10{,}2 \cdot 10^{11}$$

2° Épaisseur : 15 cm. Les hauteurs de rebondissement sont plus faibles. Dans le cas du feldspath orthose, on trouve encore $\varepsilon = 0{,}878$, donc 93 % seulement du résultat précédent.

14. Granite d'Andlau, variété « Feuille morte » (collection de l'Institut).

« Ce granite a la même composition que le précédent. Il ne s'en distingue que par sa teinte claire, où l'on remarque mieux encore la couleur rose des grands cristaux de feldspath potassique » : trois échantillons de la même roche ont été mis en expérience, à sections sensiblement pareilles, mais dont les hauteurs sont de 8 cm., 5 cm. 8 et 1 cm. 5.

1° $\varepsilon = 8$ cm.

Pour le feldspath calcosodique : $\varepsilon = 0{,}934$
Pour le feldspath orthose : $\varepsilon = 0{,}938$

$$E = \frac{7{,}7 + 7{,}0 + 5{,}6 + 7{,}0 + 8{,}2}{5} \cdot 10^{11} = 7{,}1 \cdot 10^{11}$$

Il semble que le plagioclase et l'orthose aient des coefficients de restitution très voisins.

Pour des points quelconques : $\varepsilon = 0{,}927$.

Sur le quartz :

$$E = \frac{11{,}0 + 13{,}3 + 12{,}1 + 14{,}8}{4} \cdot 10^{11} = 12{,}8 \cdot 10^{11}$$

Afin de trouver E pour le quartz, je me suis servie d'une bille minuscule. L'erreur relative est donc plus grande sur la valeur de E.

2° e = 5,8 cm.

Feldspath orthose : $\varepsilon = 0{,}948$.

Points quelconques : $\varepsilon = 0{,}935$.

Les hauteurs de rebondissements ne sont pas plus faibles que pour le premier.

3° e = 1,5 cm. : les valeurs ne sont plus comparables aux précédentes. Certains rebondissements ne conduisent qu'à $\varepsilon = 0{,}890$. Lorsque la bille touche la surface de la roche, le son qu'elle rend est beaucoup plus sec. Tout se passe comme si elle produisait une vibration intense dans la roche, d'où une plus grande perte d'énergie. Ce résultat serait donc en accord avec l'idée de Fréminville (9) que cette perte d'énergie est due à une production de vibrations dans la roche.

15. Granite de Raon-l'Étape (collection de l'Institut).

« Granite très riche en quartz. Les cristaux de feldspath et de quartz ne sont pas suffisamment grands pour qu'on puisse séparer les résultats pour l'un et l'autre des deux minéraux » : $\varepsilon = 0{,}937$ représente une moyenne obtenue en explorant toute la surface le long d'une ligne droite. Les valeurs trouvées varient entre 0,908 et 0,955. $E = 6{,}05 \cdot 10^{11}$ pour le feldspath et $E = 8{,}26 \cdot 10^{11}$ pour le quartz.

16. Granite du Felsberg (Odenwald, Hesse, Allemagne) (Le Granit d'Alsace).

« Très belle roche comparable aux diorites du Neunten-

stein. Les feldspaths sont d'un blanc pur, mais la roche est d'une teinte foncée par suite de la grande prépondérance du mica et de l'amphibole. » Sur le feldspath, les empreintes sont particulièrement nettes : tache foncée entourée d'un anneau plus clair. Sur le mica, au contraire, elles sont légèrement allongées.

Feldspath :

$$\varepsilon = 0{,}934 \quad E = \frac{8{,}2 + 7{,}0 + 7{,}5}{3} \cdot 10^{11} = 7{,}5 \cdot 10^{11}$$

Mica :

$$E = \frac{4{,}6 + 3{,}8}{2} \cdot 10^{11} = 4{,}2 \cdot 10^{11}$$

Pour un point quelconque : $\varepsilon = 0{,}874$.

Les deux valeurs très grandes mesurées pour E, pour lesquelles l'empreinte est d'ailleurs très mal visible :

$$E = \frac{10{,}8 + 10{,}4}{2} \cdot 10^{11} = 10{,}6 \cdot 10^{11},$$

correspondent probablement à l'amphibole.

17. Gabbro de Suède (même provenance que le n° 8) (Le Granit d'Alsace).

« *Roche holocristalline à feldspaths calco-sodiques prédominants, mais mettant en évidence de l'orthose et un peu de quartz individualisé. Comme éléments colorés, il faut citer l'allanite, l'augite et de l'amphibole. L'allanite (ou orthite) y est primordiale. L'augite diallagisante est altérée et passe au mica biotite. L'amphibole, elle aussi, est transformée en biotite ; elle résulte de l'altération de pyroxènes.* »

Pour ε, les mesures se groupent autour de deux maximums :

$$\varepsilon = 0{,}933 \text{ et } \varepsilon = 0{,}890$$

Pour E, on observe le même fait :

$$E_1 = \frac{6{,}3 + 5{,}9 + 6{,}9 + 6{,}6 + 5{,}5}{5} \cdot 10^{11} = 6{,}2 \cdot 10^{11},$$

valeur comparable à celle trouvée pour le n° 8 ($E_1 = 6{,}6 \cdot 10^{11}$).

$$E_2 = \frac{8{,}8 + 9{,}5 + 10{,}3}{3} \cdot 10^{11} = 9{,}5 \cdot 10^{11} \quad (E_2 = 12{,}2 \cdot 10^{11})$$

Les deux roches semblent avoir des compositions peu différentes.

18. Granite de Cornimont (collection de l'Institut).

« Il est formé de cristaux très petits et renferme beaucoup de mica. » Sur un point quelconque, $\varepsilon = 0{,}913$. Sur le feldspath, $\varepsilon = 0{,}930$. $E = 5{,}99 \cdot 10^{11}$.

L'échantillon possède deux faces polies. Les deux faces ont été soumises à l'essai, mais je n'ai pu constater de différences dans les valeurs de ε trouvées. (Quelques cristaux de feldspath isolés se trouvant sur l'une d'entre elles, il a été possible de déterminer ε pour ce minéral.)

19. Rhyolite, provient d'une coulée de la carrière située sur la route du Welschbruch au Hohwald (collection de l'Institut).

« Porphyre à quartz globulaire, c'est une roche comportant des phénocristaux et une pâte dans laquelle le quartz a l'aspect de petits globules. Les phénocristaux sont ici un feldspath potassique, un feldspath calco-sodique voisin de l'albite et le quartz. Ce dernier est corrodé. La pâte est formée de menus globules de quartz qui ont saisi de petits prismes d'orthose. En plus de ces minéraux, on voit dans la roche beaucoup de mica blanc, lié parfois à des lamelles de fer oligiste. Ces dernières sont probablement les vestiges d'un mica noir décomposé, dont on trouve, d'autre part, le titane exsudé sous forme d'anatase ($Ti\,0^2$) en très petits grains » (J. de Lapparent).

$$\varepsilon = 0{,}932 \text{ et } E = \frac{7{,}8 + 8{,}6 + 7{,}8}{3} \cdot 10^{11} = 8{,}0 \cdot 10^{11}$$

E est un peu plus grand par rapport à ε. Une seule valeur faible a été trouvée : $E = 5{,}0 \cdot 10^{11}$.

20. Trapp de Netzenbach-Wisches (Grauwacke).

Deux échantillons provenant probablement de la même carrière. « Le premier (offert à M. Rothé par M. Schnaebelé, docteur ès sciences), est plus grenu et de couleur verte, tandis que pour le second (carrière de la Socarvo) on aperçoit dans la pâte gris vert de nombreux phénocristaux de feldspath et de quartz. »

a) $\varepsilon = 0{,}928$ et $E = 5{,}68 \cdot 10^{11}$.

b) Le deuxième échantillon est moins bien poli ; il faut donc s'attendre à des chiffres plus faibles : $\varepsilon = 0{,}914$; en certains points, ε monte jusqu'à 0,920 ; cette valeur est tout à fait comparable à celle relative au premier échantillon.

E est plus petit. Les différentes mesures ne donnent que

$$E = \frac{3{,}4 + 4{,}0 + 3{,}9 + 3{,}5}{4} \cdot 10^{11} = 3{,}8 \cdot 10^{11}$$

valeur très faible de E par rapport à ε.

21. Quartzite de Voegtlinshoffen (carrière de la « Socarvo »).

« Grès quartzeux de couleur rouge brunâtre à grains très fins. » La surface est bien polie, mais en beaucoup d'endroits les grains de quartz sont arrachés. On ne peut donc tenir compte des empreintes que dans les régions uniformes et pour lesquelles les valeurs de h sont constantes.

$\varepsilon = 0{,}922$ ($0{,}890 < \varepsilon < 0{,}950$ suivant les points frappés).

E part de $2{,}5 \cdot 10^{11}$ (correspondant peut-être aux très faibles valeurs de ε) pour un seul point, à des valeurs plus grandes :

$$E = \frac{4{,}2 + 4{,}3 + 4{,}9 + 4{,}9 + 5{,}9}{5} \cdot 10^{11} = 4{,}8 \cdot 10^{11}$$

22. Minette de Saint-Nabor (carrières de Saint-Nabor).

« Roche filonienne traversant les dacites de la carrière. Elle est à grain très fin et principalement composée de feldspath

orthose et de mica noir » : les hauteurs de rebondissement mesurées se groupent autour de deux noyaux donnant des valeurs de ε égales à 0,847 et 0,949. Il est probable que — comme pour les granites — le mica conduit à des chiffres bien plus faibles que les autres minéraux.

Le même phénomène se produit pour E, dont les valeurs suivant les points frappés sont comprises entre 2,3 et 4,7 . 10^{11}.

$$E = \frac{2,3 + 3,1 + 3,3 + 4,2 + 4,7}{5} \cdot 10^{11} = 3,5 \cdot 10^{11}$$

23. Rhyolite du Neuntenstein, recueillie sur le terrain (région déboisée très proche du Neuntenstein) (collection de l'Institut).

« Composition sensiblement la même que celle de la rhyolite n° 19, mais dans cet échantillon les phénocristaux sont plus nombreux et ont des dimensions plus grandes » :

$$\varepsilon = 0,909 \quad E = \frac{6,1 + 5,8 + 6,7 + 6,3}{4} \cdot 10^{11} = 6,2 \cdot 10^{11}$$

Comme pour la rhyolite n° 19, E est très grand par rapport à ε. Une seule mesure effectuée sur un gros cristal a donné une plus petite valeur : $E = 5,5 \cdot 10^{11}$.

24. Rhyolite (route du Hohwald) (collection de l'Institut).

« Elle provient de la même carrière que la rhyolite n° 19, mais appartient à une autre coulée, car elle est moins compacte. » Elle n'a pu être qu'aplanie et non polie, de sorte que les chiffres obtenus sont probablement un peu faibles. En moyenne : $\varepsilon = 0,897$.

25. Porphyre de Saint-Michel (Meurthe-et-Moselle) (collection de l'Institut).

« Roche de la famille des rhyolites ; les phénocristaux sont

plus nombreux que dans le cas des rhyolites ; elle se rapproche beaucoup des rhyolites du Nideck. »

$$\varepsilon = 0{,}892 \text{ et } E = 15{,}82 \cdot 10^{11}$$

26. Diorite du Neuntenstein (collection de l'Institut).

« *Roche holocristalline formée de feldspaths calco-sodiques, de hornblende commune et de biotite. Un peu de quartz individualisé, intersertal, mais pas assez pour en faire une diorite quartzifère. Cette roche peut être rapprochée de ce que les auteurs américains appellent une* 'granodiorite'. » Sa description a été donnée par différents auteurs, en particulier Bücking (5) et Rosenbusch (24). La valeur trouvée pour ε, 0,892, est certainement inexacte, car les hauteurs de rebondissement sont trop variables pour qu'il soit permis d'en déduire une moyenne. J'ai fait soixante-deux mesures sur la même roche et ai essayé de grouper les résultats en construisant la courbe de fréquence ci-dessus (fig. 3).

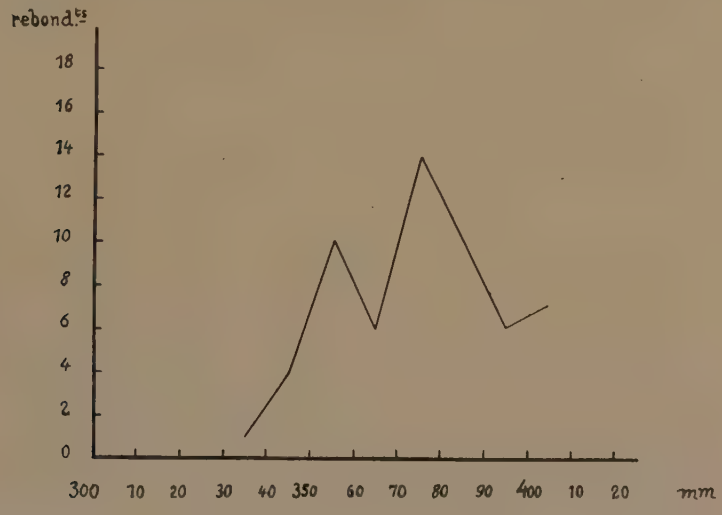


Fig. 3. — Courbe de fréquence : mesure de h sur la diorite du Neuntenstein.

En abscisses, j'ai porté les hauteurs moyennes des rebondissements prises de 10 en 10 millimètres, en ordonnées le nombre des rebondissements correspondants.

Il ne semble pas qu'on puisse déduire de cette courbe des valeurs caractéristiques pour ε.

E présente également de très grandes variations. Les empreintes ont été faites à l'aide de billes de différentes dimensions.

Sur les feldspaths :

$$E = \frac{6,3 + 7,7 + 6,6}{3} \cdot 10^{11} = 6,8 \cdot 10^{11}$$

Sur l'amphibole :

$$E = \frac{8,1 + 10,0 + 11,4}{3} \cdot 10^{11} = 9,8 \cdot 10^{11}$$

Une valeur exceptionnellement grande : $E = 16,4 \cdot 10^{11}$.

27. Schiste de Schirmeck (Terrazzo des Vosges).

« Schiste grauwackeux, calcareux, à radiolaires » : roche noire très homogène ; on le constate d'ailleurs autant par les mesures de ε que par la forme des empreintes qui sont très nettes : une tache noire entourée d'un anneau plus clair.

$$\varepsilon = 0,883 \text{ et } E = \frac{3,3 + 3,7 + 3,8 + 3,3}{4} \cdot 10^{11} = 3,5 \cdot 10^{11}$$

28. Marbre de Hauteville (marbrerie de la Schachenmühle).

« Marbre jaune finement cristallisé, traversé de veines de coloration plus intense ; un filon de calcite pure est visible sur l'un des bords de la surface polie. »

Chiffres constants : $\varepsilon = 0,869$, $E = 3,33 \cdot 10^{11}$.

Quand la bille tombe sur un filon de calcite, elle rebondit moins haut et elle laisse une empreinte ; dans ce cas :

$$\varepsilon = 0,841.$$

29. Tuf dacitique de Saint-Nabor (carrières de Saint-Nabor).

« *Montre, sur un fond feldspathique, des phénocristaux de feldspaths calco-sodiques (prédominants), d'orthose et de quartz.* »

Deux séries de chiffres ont été déterminées pour ε :

$$\varepsilon = 0{,}881 \text{ et } 0{,}850, \text{ en moyenne } \varepsilon = 0{,}867$$

Pour E, on peut aussi classer les résultats en deux groupes :

$$E_1 = \frac{2{,}8 + 2{,}3}{2} \cdot 10^{11} = 2{,}5 \cdot 10^{11}$$

et

$$E_2 = \frac{3{,}8 + 4{,}0 + 3{,}7}{3} \cdot 10^{11} = 3{,}8 \cdot 10^{11}$$

30. Marbre Napoléon « Grand mélange », Hydrequent (Pas-de-Calais) (marbrerie de la Schachenmühle).

Pour l'étude détaillée de ce marbre ainsi que des autres marbres du Boulonnais, il suffit de consulter la thèse de M. Derville (8).

« L'échantillon se compose de deux parties, l'une à ramifications, l'autre stratifiée », pour lesquelles les valeurs de ε sont 0,863 et 0,865. Il ne semble donc pas que le coefficient de restitution varie d'une manière appréciable de l'une à l'autre. Sur une veine de calcite, ε tombe à 0,769, $E = 3{,}3 \cdot 10^{11}$.

31. Marbre Napoléon tigré « Pattes d'Alouettes », Hydrequent (Pas-de-Calais).

Pour cet échantillon que M. Derville a mis à ma disposition, on trouvera également une description détaillée dans l'ouvrage cité plus haut :

$$\varepsilon = 0{,}845 \quad E = \frac{2{,}9 + 2{,}9 + 2{,}7}{3} \cdot 10^{11} = 2{,}8 \cdot 10^{11}$$

Les chiffres restent très concordants aussi longtemps que la

bille ne tombe pas sur une tache de calcite. Dans ce cas, ε devient faible : $\varepsilon = 0{,}786$ et

$$E = \frac{2{,}18 + 2{,}24 + 2{,}0}{3} \cdot 10^{11} = 2{,}14 \cdot 10^{11}.$$

32. Marbre « Granit belge » du bassin de l'Ourthe (Belgique) (Marbrerie de la Schachenmühle).

« Marbre où d'innombrables crinoïdes et des débris de brachiopodes de différentes grosseurs sont visibles dans une pâte foncée. » Les chiffres diffèrent beaucoup suivant que la bille tombe sur la pâte ou sur les encrines :

1° Sur la pâte :

$$\varepsilon = 0{,}844 \quad E = \frac{3{,}2 + 3{,}7 + 3{,}6}{3} \cdot 10^{11} = 3{,}5 \cdot 10^{11}$$

2° Sur un débris de brachiopode :

$$\varepsilon = 0{,}923 \quad E = \frac{3{,}2 + 2{,}9}{2} \cdot 10^{11} = 3{,}05 \cdot 10^{11}$$

3° Sur une encrine coupée perpendiculairement à l'axe :

$$\varepsilon = 0{,}787 \quad E = \frac{2{,}8 + 2{,}9}{2} \cdot 10^{11} = 2{,}85 \cdot 10^{11}$$

4° Sur une encrine coupée dans le sens de l'axe :

$$\varepsilon = 0{,}815 \quad E = 3{,}5 \cdot 10^{11}$$

Dans ce cas toutes les empreintes sont allongées, et l'on trouve des différences de 47 % pour des diamètres mesurés dans des directions perpendiculaires.

5° Sur une encrine coupée perpendiculairement à l'axe :

$$\varepsilon = 0{,}680 \quad E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$$

Les variations d'un point à un autre sont beaucoup plus grandes pour ε que pour E.

33. Granite du Kagenfels.

Il se différencie nettement des granites du Champ-du-Feu au point de vue de sa composition. Une étude détaillée en a été faite par Bücking (5) et plus récemment par Schnaebelé (26). D'après ce dernier auteur ce granite, qui ressemble à une énorme pegmatite, est *la roche éruptive la plus jeune de tout le massif.*

L'échantillon qui m'a servi n'a pas la forme parallélépipédique habituelle ; il a des contours irréguliers et n'a pas partout la même épaisseur ; $\varepsilon = 0{,}837$ en moyenne et $E = 8{,}85 \cdot 10^{11}$. Cette valeur exceptionnellement faible de ε par rapport à E est due probablement à la structure poreuse, miarolitique, de cette roche. Les chiffres sont d'ailleurs très différents suivant les régions sur lesquelles tombe la bille. Les plus faibles ont été obtenus pour des points situés près de cristaux d'hématite où ε descend jusqu'à 0,766. Les valeurs les plus élevées ne dépassent pas 0,852 [1].

34. Cipolin de Sainte-Croix-aux-Mines (Terrazzo des Vosges).

« C'est un cipolin à mica phlogopite et à forstérite. Les minéraux sont groupés suivant des bandes de composition homogène alternant avec des lits de calcaire pur » : il a été étudié par MM. Michel-Lévy et Lacroix (16) et par Jung (11). L'échantillon a été poli perpendiculairement aux lignes de stratification.

1° Calcaire pur :

$$\varepsilon = 0{,}836 \quad E = \frac{4{,}0 + 3{,}1 + 3{,}8}{3} \cdot 10^{11} = 3{,}4 \cdot 10^{11}$$

2° Forstérite :

$$\varepsilon = 0{,}844 \quad E = \frac{5{,}3 + 4{,}8}{2} \cdot 10^{11} = 5{,}0 \cdot 10^{11}$$

1. Ce granite se distingue également des autres roches du massif par certaines propriétés physiques qui font l'objet d'expériences actuellement en cours à l'Institut de Physique du Globe.

3° Mica phlogopite :

$$\varepsilon = 0{,}807 \quad E = \frac{3{,}2 + 3{,}1}{2} \cdot 10^{11} = 3{,}1 \cdot 10^{11}$$

En ce qui concerne le coefficient de restitution il ne semble pas que la forstérite, qui est un silicate de magnésium, introduise un changement notable. Au contraire la bille laisse des empreintes bien visibles sur le mica phlogopite, d'où le chiffre plus petit de ε.

35. Grès argilo-micacé de Ribeauvillé (Terrazzo des Vosges).

« *Roche formée de quartz, feldspaths et micas détritiques sur un fond feldspathique et quartzeux. Parmi les matériaux détritiques, on observe de l'orthose et certains éléments caractéristiques des porphyres permiens. Aux dépens de la phyllite se sont formés de nombreux petits rutiles ; ils ont été amenés avec la phyllite déjà décomposée.* »

Cette roche à grain très fin donne des valeurs constantes pour ε et E :

$$\varepsilon = 0{,}827 \quad E = \frac{1{,}4 + 1{,}5 + 1{,}5}{3} \cdot 10^{11} = 1{,}5 \cdot 10^{11}$$

Une seule exception a été notée pour E : $3{,}8 \cdot 10^{11}$, due sans doute soit à la présence d'un cristal, soit à l'inclusion d'un corps étranger.

36. Marbre Lunel rubané « Notre-Dame » (Boulonnais) (H. Derville).

L'échantillon qui m'a été prêté par M. Derville n'est pas poli, mais seulement aplani sur deux faces perpendiculairement au lit de la carrière. Il n'a pu être étudié que sur une face, les aspérités laissées par le sciage étant trop grandes sur la seconde pour permettre des mesures exactes.

1° Partie supérieure de l'échantillon : $\varepsilon = 0{,}777$.

2° Partie inférieure : $\varepsilon = 0{,}821$.

E n'a pas pu être déterminé ; il semble que l'échantillon se compose de deux parties dont l'une est plus élastique que l'autre.

37. Cipolin des carrières de Sainte-Croix-aux-Mines (Terrazzo des Vosges).

« Calcaire spathique largement cristallisé. » D'après Delesse (7), il est formé de calcite pure.

$$\varepsilon = 0{,}763 \text{ et } E = \frac{1{,}9 + 2{,}0 + 1{,}93 + 1{,}8}{4} \cdot 10^{11} = 1{,}9 \cdot 10^{11}$$

Or pour des filons isolés de calcite provenant de marbres d'Hydrequent et de Hauteville, j'avais obtenu les valeurs suivantes :

marbre de Hauteville : $\varepsilon = 0{,}841$,

marbre Napoléon « Grand mélange » : $\varepsilon = 0{,}769$,

marbre Napoléon tigré « Pattes d'Alouettes » : $\varepsilon = 0{,}786$,

qui sont du même ordre de grandeur que celles du cipolin, un peu plus grandes toutefois, car on ne peut pas supprimer l'influence des parties environnantes de la roche, plus élastiques.

38. Marbre de Seravezza « Fleur de pêcher » (Italie) (Marbrerie de la Schachenmühle).

« Marbre finement cristallisé, de couleur et par suite de composition non constante. Il est traversé par de nombreuses veines de calcite, ainsi que par un filon comprenant des cristaux plus importants. » La bille laisse des empreintes sur la masse ; théoriquement le calcul de E n'a donc pas beaucoup de sens :

$\varepsilon = 0{,}757$; on aurait $E = 2{,}23 \cdot 10^{11}$

Le coefficient de restitution varie avec la couleur de l'endroit frappé, donc avec la composition. Il va de 0,773 à 0,739 à mesure que la couleur va du violet au gris.

Sur la calcite : $\varepsilon = 0{,}696$. Sur le filon cristallisé : $\varepsilon = 0{,}763$.

39. Marbre blanc (Italie) (collection de l'Institut).

On ne voit aucune particularité à la surface de la roche ; les valeurs trouvées pour ε et E sont constantes :

$$\varepsilon = 0{,}707 \quad E = 2{,}78 \,.\, 10^{11}$$

40. Calcaire oolithique a dendrites de Rosheim (Terrazzo des Vosges).

« Pâte jaune, l'oxyde de manganèse et de fer s'est déposé sous forme d'arborisations noires, pareilles à des fougères, des dendrites, sur les cassures planes du calcaire. »

La bille laisse de faibles empreintes sur la roche. Sur le calcaire : $\varepsilon = 0{,}666$; sur les dendrites : $\varepsilon = 0{,}707$. La présence des éléments métallifères paraît augmenter le coefficient de restitution, qui ne peut d'ailleurs être qu'une moyenne entre ceux du calcaire et ceux des dendrites, ces dernières ayant de très faibles dimensions.

$$E = \frac{0{,}48 + 0{,}52 + 0{,}87 + 0{,}89 + 1{,}1}{5} \,.\, 10^{11} = 0{,}75 \,.\, 10^{11}$$

On peut probablement faire le classement suivant :

$$\text{calcaire} : E = \frac{0{,}48 + 0{,}52}{2} \,.\, 10^{11} = 0{,}50 \,.\, 10^{11}$$

$$\text{dendrites} : E = \frac{0{,}87 + 0{,}89 + 1{,}1}{3} \,.\, 10^{11} = 0{,}92 \,.\, 10^{11}.$$

41. Asphalte de Lobsann (Asphaltes et Bitumes de Lobsann).

Échantillon seulement aplani ; la détermination de E n'a pas pu être faite.

$$\varepsilon = 0{,}349.$$

CONCLUSION

Les tableaux (pages 11 et 12) résument les résultats des mesures effectuées sur les roches : pour un certain nombre d'entre elles et notamment pour les granites ou les diorites, la classification peut paraître un peu arbitraire. Pour les autres, au contraire, il semble exister une certaine loi de continuité, ε et E varient dans le même sens à quelques exceptions près. On constate en effet que pour les rhyolites et l'ophite de Dax, ainsi que pour le porphyre de Saint-Michel, appartenant aussi à la famille des rhyolites, les valeurs trouvées pour E sont particulièrement grandes par rapport à celles de ε. Le granite de Kagenfels constitue une autre exception ; il se place beaucoup plus loin dans la série des roches que les autres granites et se trouve rangé au point de vue de la restitution parmi les calcaires. Il figurerait, au contraire, en tête des autres granites si le classement avait été fait par rapport aux valeurs décroissantes de E. D'après Bücking (5) il appartient à un massif plus jeune que les autres granites ; Schnaebelé (26) le classe même après les rhyolites du Champ-du-Feu. Or on constate par les chiffres du tableau que les roches récentes ont des coefficients de restitution plus petits que les roches anciennes.

Ce sont les roches volcaniques qui ont les plus grands coefficients de restitution, les roches sédimentaires les plus petits ; ε paraît décroître avec l'acidité des roches. Les granites forment un groupe compact et ne se différencient guère les uns des autres.

J'ai marqué d'un astérisque * celles des roches pour lesquelles les valeurs de ε et de E trouvées en différents points de la surface polie sont suffisamment constantes pour que le calcul d'une valeur moyenne de ε ait un sens réel. Pour ces roches, j'ai établi le graphique suivant : en abscisses j'ai porté les valeurs de ε, en ordonnées celles de E. Les points

obtenus se rangent tous suivant une courbe d'allure simple. On pourrait en déduire une relation — bien qu'empirique — entre ε et E, et par conséquent on aperçoit la possibilité d'obtenir E d'après la valeur de ε, alors que sa mesure directe exige un temps assez long et des opérations délicates (fig. 4).

L'attention de M. Oddone (20) avait été appelée sur cette question : « Non seulement, dit-il, la méthode pourrait être transformée de manière à permettre la mesure de la dureté — par l'introduction de forces dépassant les limites d'élasticité des corps — mais encore dans les cas où ε est assez voisin de 1 et où la loi de Hooke pourrait être appliquée, il serait possible de déduire la valeur de E de celle de ε à l'aide de cette courbe empirique[1]. »

Prenons un exemple : pour le feldspath dans les différents granites, on trouve $0{,}930 < \varepsilon < 0{,}939$. En nous reportant au graphique, nous pouvons en déduire que E est voisin de $6 \cdot 10^{11}$. Or ce sont des chiffres de cet ordre de grandeur que l'on obtient par la mesure de l'empreinte.

Les résultats que j'ai obtenus relativement à E sont presque toujours inférieurs à ceux de M. Oddone (20) ; ils s'accordent, au contraire, avec ceux de M. Castan (6). Les valeurs relatives aux roches d'Alsace sont encore plus grandes que celles données par d'autres expérimentateurs. En effet, si nous nous reportons au tableau de la page 11, nous constatons que pour les granites E est compris entre $6{,}0 \cdot 10^{11}$ (Cornimont) et $10 \cdot 10^{11}$ (Andlau, « Feuille morte »).

Mais on a, d'après

Nagaoka (19) : $1{,}9 \cdot 10^{11} < E < 4{,}2 \cdot 10^{11}$.

Kusakabe (12) : $1{,}4 \cdot 10^{11} < E < 4{,}2 \cdot 10^{11}$, obtenu par une méthode basée sur la torsion.

$2{,}2 \cdot 10^{11} < E < 3{,}9 \cdot 10^{11}$, obtenu par une méthode basée sur la flexion (procédé statique).

$4{,}6 \cdot 10^{11} < E < 4{,}9 \cdot 10^{11}$, obtenu par

1. Aucun traité de mécanique ou de balistique n'aborde, à ma connaissance, la relation entre ε et E au point de vue théorique.

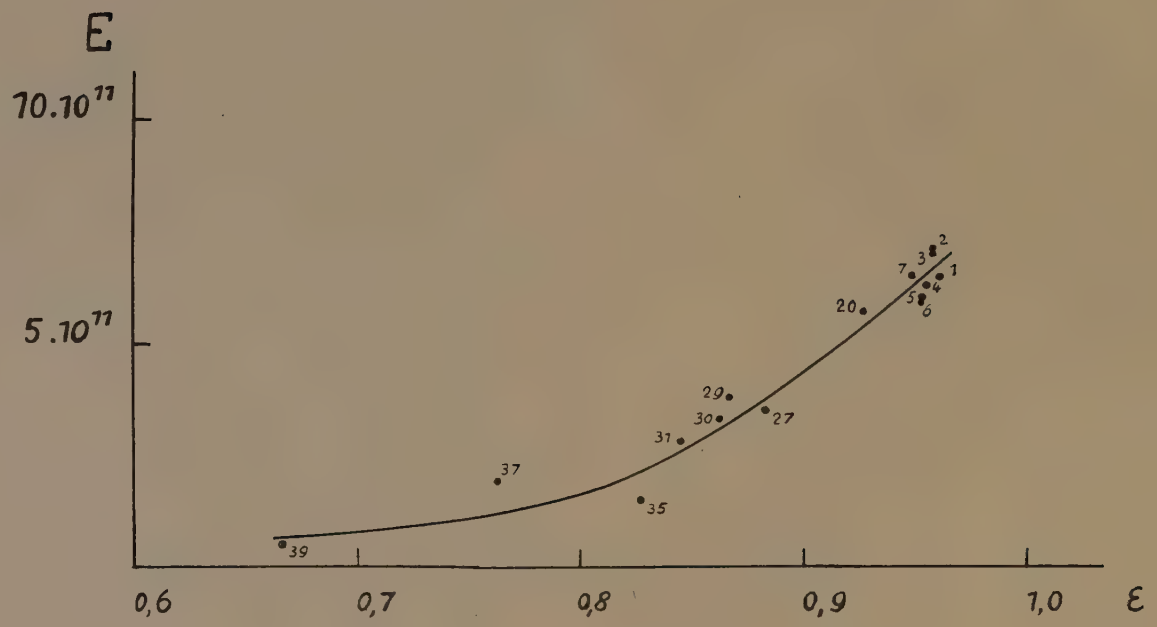


Fig. 4. — Courbe de E en fonction de ε pour quelques roches homogènes.

une méthode basée sur la flexion (procédé dynamique).

Adams et Coker (1) : $3{,}9 \cdot 10^{11} < E < 5{,}9 \cdot 10^{11}$.

Et, plus récemment :

Zisman (30) : $3{,}48 \cdot 10^{11}$ pour un granite de Rockport (Massachusetts).

Or, des inscriptions obtenues par les Instituts de Physique du Globe de Strasbourg et de Paris lors des explosions de la Courtine (25, 18), on avait déduit une vitesse moyenne des ondes séismiques de 5,5 km/sec. pour les vibrations longitudinales dans un terrain granitique, ce qui conduit en appliquant la formule

$$V = \sqrt{\frac{6}{5} \cdot \frac{E}{\rho}}$$

et en adoptant pour ρ la valeur moyenne 2,65, à une valeur approximative de E égale à

$$E = \frac{5 \cdot \rho \cdot V^2}{6} = 6{,}68 \cdot 10^{11}.$$

Ce chiffre théorique se place, comme M. Oddone l'avait constaté (20), entre les valeurs trouvées par les autres méthodes et celles données par le procédé de l'empreinte. Leet et Ewing (13) ont obtenu des vitesses un peu plus faibles aux États-Unis (Massachusetts et Rhode-Island) : $V = 5{,}04 \pm 0{,}03$ km/sec. dans les massifs granitiques et par suite $E = 4{,}3 \pm 0{,}1 \cdot 10^{11}$.

Au cours des expériences j'ai très souvent obtenu des chiffres de l'ordre de ceux déterminés par M. Oddone, mais ils correspondaient toujours à un point singulier de la roche — par exemple pour un gros cristal d'olivine dans un gabbro de Suède, E monte à $22{,}9 \cdot 10^{11}$. Pour l'ophite de Dax, plusieurs empreintes conduisent à des valeurs de E supérieures à $20 \cdot 10^{11}$. Mais pour la pâte même de la roche, qui en constitue en somme la majeure partie, les chiffres sont bien plus petits.

PHOTOGRAPHIE DES REBONDISSEMENTS SUCCESSIFS D'UNE BILLE D'ACIER SUR UNE FACE POLIE D'UNE ROCHE

Après avoir mesuré le coefficient ε pour un certain nombre de roches des Vosges, je me suis proposé de rechercher comment se comporte la bille au cours des rebondissements qui suivent le premier. Si on la fait tomber successivement sur deux blocs de roches de nature différente tels que, par exemple, du marbre blanc et la grauwacke qu'on désigne dans l'industrie des matériaux sous le nom de « trapp », on constate que la bille ne rebondit que trois à quatre fois sur le premier et plus de cinquante fois sur le second. J'ai d'abord déterminé par visée directe les hauteurs atteintes successivement par la bille. Pour les premiers rebondissements, nettement distants les uns des autres en hauteur et séparés par des intervalles de temps notables, la mesure est assez aisée. Même si l'on admet une erreur de quatre à cinq millimètres sur une lecture on peut, en prenant une moyenne, obtenir des chiffres suffisamment concordants. Pour faciliter les visées, j'ai procédé de la manière suivante : le tube de verre de l'appareil est entouré d'un curseur annulaire noir qu'on peut déplacer dans le sens vertical. Après avoir déterminé la hauteur moyenne du premier rebondissement par une série de mesures, j'ai recouvert à l'aide de cet anneau la région correspondante du tube ; puis je l'ai déplacé peu à peu jusqu'à ce qu'il fût sensiblement tangent à la bille lors de son second rebondissement. En procédant de cette façon de proche en proche, on améliore la précision de la visée. C'est ainsi que j'ai étudié plusieurs marbres et les deux échantillons de trapp.

Mais cette méthode visuelle directe ne permet pas d'observer les derniers rebondissements, qui se suivent trop rapidement. Il arrive pour toutes les roches un moment où la bille, dans ses derniers rebondissements, atteint des maximums

trop rapprochés pour qu'on puisse encore les distinguer. Pour des roches telles que le trapp de Netzenbach par exemple, il devient impossible d'apprécier encore les hauteurs atteintes par la bille après une vingtaine de rebondissements, ceux-ci se succédant à l'intervalle de 1/10e de seconde environ.

Exemple. — Sur le tableau ci-dessous, j'ai noté les hauteurs des rebondissements successifs de la bille d'acier, mesurées en millimètres, sur deux échantillons de trapp provenant l'un de Raon-l'Étape, l'autre de Netzenbach (hauteur initiale : 458 mm.) :

N° d'ordre des rebondissements	Trapp de Raon	Trapp de Netzenbach
1	416	389
2	388	331
3	354	281
4	333	242
5	310	218
6	293	207
7	278	191
8	261	177
9	248	164
10	233	153
11	222	148
12	213	139
13	203	133
14	193	128
15	185	123
16	178	119
17	173	116
18	168	113
19	161	
20	158	
21	151	
22	145	
23	140	
24	134	
25	129	
26	124	
27	120	
28	115	
29	110	
30	106	
31	102	
32?	99?	

M. Rothé m'a donc engagée à recourir à une méthode d'inscription permettant de suivre le mouvement jusqu'à l'arrêt total de la bille sur la surface polie de la roche, c'est-à-dire à une méthode photographique.

Il y avait lieu de s'inspirer de nombreux travaux relatifs à l'inscription des mouvements rapides, et plus particulièrement de ceux du physicien Marey (17). Après un certain nombre d'essais qui ne m'ont fourni que des résultats insuffisants j'ai obtenu avec le concours de M. Rempp, professeur à la Faculté des Sciences, à qui j'adresse mes remerciements, des photographies satisfaisantes. Les premiers clichés (éclairage à la lampe à arc) montraient ce que l'on obtient en laissant le tube de verre en place et en photographiant à travers le verre. On distingue nettement les maximums de lumière relatifs aux différents rebondissements, mais la présence du tube de verre empêche de suivre le phénomène jusqu'au bout. Il m'a semblé préférable de le supprimer. Sur le cliché que j'ai obtenu on voit clairement les différents rebondissements qui se confondent en partie, car dans cette série d'essais relative à l'éclairage l'appareil photographique demeurait immobile pendant toute la durée du phénomène.

Pour l'obtention des clichés suivants j'ai fait subir à l'appareil photographique une rotation autour de sa vis de serrage, ce qui revient à le faire tourner autour d'un axe vertical. Afin d'avoir sur le cliché une ligne de base et l'amplitude de la rotation, j'avais fixé contre les parois de la roche des épingles brillantes qui, pendant le déplacement, inscrivaient des lignes droites.

Au cours des expériences ultérieures, j'ai supprimé les épingles et les ai remplacées par une échelle spéciale faite en billes analogues à celles utilisées pour les mesures.

Ces résultats étaient assez encourageants pour qu'on s'occupât de monter un dispositif capable d'entraîner l'appareil d'un mouvement uniforme. J'ai employé les deux modes de déplacement, la rotation autour d'un axe et la translation.

1. Mouvement de rotation.

L'appareil photographique était monté comme il vient d'être dit pour pouvoir tourner autour de sa vis de serrage. Une corde fixée à la partie postérieure de l'abattant s'enroulait à son autre extrémité sur un cylindre entraîné par un mouvement d'horlogerie (inscripteur Mintrop appartenant à l'Institut et qui servait dans un séismographe). Les liaisons étaient faites de telle manière que la mise en marche du mouvement d'horlogerie produisait la tension de la corde et entraînait la rotation de l'appareil ; la vitesse de rotation et l'amplitude du déplacement correspondant étaient d'ailleurs aisément réglables. Bien qu'il ait donné de bons résultats, ce dispositif présentait un inconvénient : au cours de la rotation qui s'effectue non autour d'un axe vertical passant par le centre de l'objectif, mais bien autour d'un axe situé entre cet objectif et le plan de l'image, la distance de l'objectif à la bille varie et l'on n'inscrit pas pendant toute la rotation les images et les mouvements avec le même grandissement. Pour s'en apercevoir, il suffit d'observer les lignes formées par l'inscription des billes de l'échelle de comparaison ; ces lignes devraient être parallèles ; or, sur le cliché elles se rapprochaient les unes des autres.

2. Mouvement de translation.

J'ai utilisé le très bon inscripteur universel Boulitte que possède l'Institut et qui est muni d'un chariot se déplaçant le long d'une vis sans fin. Sur ce chariot, j'ai fait monter un plateau de bois très stable percé de plusieurs trous permettant de régler la distance entre la bille et l'appareil photographique, ce dernier étant solidement fixé sur le plateau. Il est dès lors très facile, en combinant les différentes poulies qui servent au changement des vitesses, de communiquer à l'appareil des vitesses de translation variables. Le dispositif à photographier est placé devant l'inscripteur. La roche et la bille sont très fortement éclairées par un arc. Des écrans convenablement placés et des étoffes noires mates suppriment la

lumière diffuse et les réflexions sur toutes les parties métalliques.

Échelle de billes. — Par suite du déplacement de l'appareil photographique, la plaque sensible inscrit une série de courbes dont les maximums correspondent aux points les plus élevés atteints par la bille. Ces courbes devraient se raccorder exactement sur le plan de la roche, au point où a lieu le rebondissement. Or, en examinant soigneusement les clichés, on constate qu'il n'en est rien et que le raccord se fait un peu au-dessus de ce plan. On peut d'ailleurs apercevoir sur le cliché l'image de cette courbe fournie par la surface polie de la roche, jouant ici le rôle de miroir. En effet, ce que l'on inscrit ce n'est pas l'image de la bille elle-même, qui ne se réduirait pas à un point, mais celle de l'arc électrique fournie par la surface de la bille qui joue ici le rôle de miroir convexe sphérique. Suivant la hauteur de la bille par rapport à l'arc, le point où se fait la réflexion change de place, de sorte que l'on n'inscrit pas exactement la hauteur de rebondissement mais une hauteur moindre, valeur d'ailleurs sensiblement égale à la hauteur réelle diminuée du diamètre de la bille.

Cette difficulté exigeait l'emploi d'une échelle de comparaison formée par des billes identiques à celles que j'utilisais. Deux lames de laiton taillées en biseau vers l'avant serrent entre elles neuf billes : la première placée de telle manière que, si l'échelle repose sur la roche, cette bille lui est tangente. Les observations permettent de constater que le point inscrit se trouve sensiblement à la hauteur de l'équateur de la bille. Les huit autres billes se trouvent respectivement à 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 et 25 cm. de la première. A sa partie supérieure, l'échelle porte une tige horizontale pouvant être fixée sur un support. Toute l'échelle, à l'exception des billes soigneusement polies, est noircie à l'encre de Chine. Quand la plaque photographique se déplace devant elle, les points lumineux correspondant aux différentes billes inscrivent chacun une ligne droite. L'écart des lignes varie légèrement avec la

hauteur. Une interpolation facile permet les mesures à toutes les hauteurs.

Cependant, il faut remarquer que la bille au cours de ses rebondissements successifs se déplace légèrement sur la roche. Il est très facile de se rendre compte et du sens et de la grandeur du déplacement : en effet, l'objectif, tel qu'il est utilisé, n'a qu'une profondeur de champ extrêmement réduite. Car, si n est l'indice de l'ouverture du diaphragme de l'objectif, r le rapport de l'image à l'objet, e la limite de netteté de l'image, Δ la profondeur du sujet, on peut aisément établir la formule approchée (22) :

$$n = \frac{\Delta}{2e} \cdot \frac{r^2}{1 + r}$$

Remplaçons les lettres par leurs valeurs :

$$e = 0{,}01 \text{ cm. (approx.)}$$

Au cours des expériences, j'ai presque toujours diaphragmé à $\frac{f}{32}$ au moins, $n = 32$. Si l'on photographie en vraie grandeur $r = 1$.
On en déduit :

$$\Delta = \frac{2e\, n\, (1 + r)}{r^2} = 2 \times 0{,}01 \times 32 \times 2 = 1 \text{ cm. } 28$$

En réduisant de moitié, la profondeur de champ augmente :

$$\Delta = 2 \times 0{,}01 \times 32 \times 3 \times 4 = 3 \text{ cm. } 84$$

A l'aspect du cliché, on peut voir si la courbe inscrite correspond bien à la réalité. En effet, si elle est nette du début à la fin, cela signifie que la bille s'est à peine déplacée en profondeur. Les mesures d'amplitudes ne comporteront donc aucune correction. Par contre, si on s'aperçoit que la courbe devient floue, il faut en conclure que la distance de la bille à l'objectif a varié. De la position de la base de la courbe par rapport au trait provenant de l'inscription de la bille infé-

rieure de l'échelle de comparaison, on peut déduire si la bille s'est rapprochée de l'appareil (amplitudes trop grandes) ou éloignée (amplitude de l'image trop faible).

Il est donc très facile de se rendre compte de la grandeur et du signe des erreurs que l'on commet.

Le dispositif présente un inconvénient que je n'ai pu supprimer : le plateau portant l'appareil photographique subit de petites vibrations et les billes de l'échelle décrivent non pas des lignes droites, mais des sinusoïdes d'une très faible amplitude, trop peu importante d'ailleurs pour introduire une déformation notable des courbes inscrites.

RÉSULTATS OBTENUS

J'ai photographié les rebondissements successifs d'une bille d'acier sur les marbres de Seravezza, d'Hydrequent Napoléon « Grand mélange » et de Hauteville, sur le granite d'Andlau variété « Feuille morte », sur les trapps de Netzenbach et de Raon-l'Étape, et sur une pièce cylindrique d'acier trempé. Pour la plupart de ces corps, les premiers rebondissements, ceux dont la hauteur dépasse encore 10 cm., ont été notés par visée directe, de sorte qu'il est possible, en raccordant ces deux courbes, de se rendre compte de toute la marche du phénomène.

1. Marbre de Seravezza (fig. 5).

Les hauteurs décroissent très vite ; on a 20 rebondissements pour lesquels h est inférieur à 10 cm. La bille rebondit donc en tout 22 fois si l'on tient également compte des observations directes. Vers la fin du phénomène, le trait représentant la trajectoire de la bille est double. La deuxième image, beaucoup moins lumineuse, est due soit à une double réflexion à la surface de la roche, soit au fait que l'image de l'arc électrique ne se réduit pas à un point correspondant à une source ponctuelle mais à deux points distincts provenant des deux charbons.

2. Marbre d'Hydrequent Napoléon « Grand mélange », (fig. 6).

On compte 35 rebondissements dont la hauteur est inférieure à 10 cm. Comme on peut déjà en noter 4 dont $h > 10$ cm., la bille rebondit en tout 39 fois.

3. Marbre de Hauteville (fig. 7).

35 rebondissements dont la hauteur est inférieure à 10 cm.

et 4 au-dessus de 10 cm., soit au total 39 rebondissements. Ce marbre se rapproche d'ailleurs beaucoup du précédent et sa

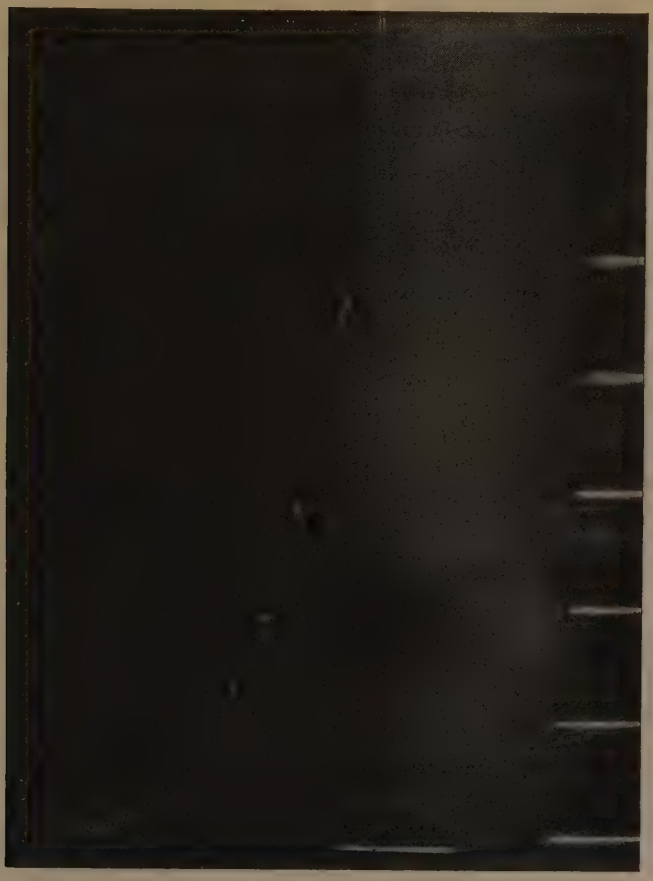


Fig. 5. — Marbre de Seravezza.

courbe de décroissance de ε se place entre celles des deux variétés du marbre d'Hydrequent.

Les différentes inscriptions conduisent à une même remarque : vers la fin du phénomène, on note une variation brusque de l'amplitude. La visée directe permettrait seule-

ment de constater que la bille cesse de sauter et semble rouler, mais sur la photographie on note une vibration résiduelle

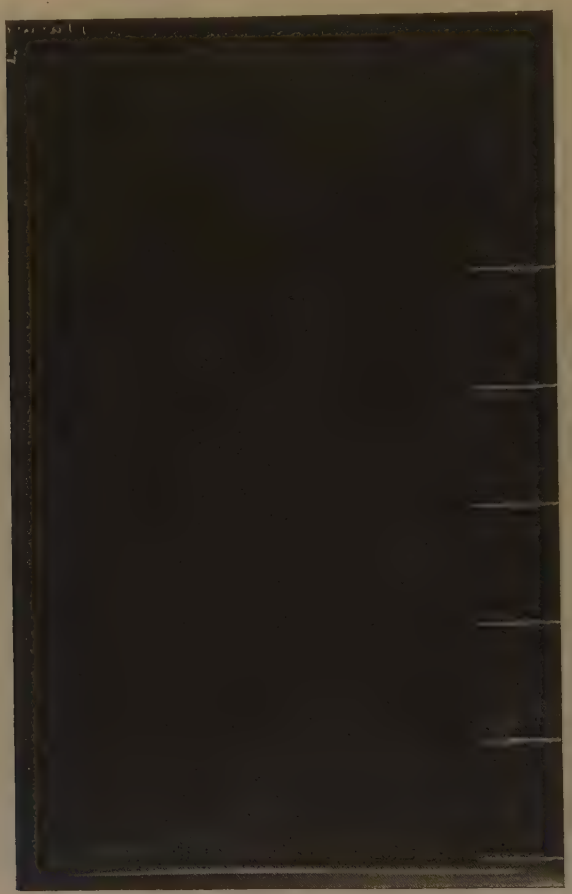


Fig. 6. — Marbre Napoléon « Grand mélange ».

que l'on ne peut attribuer à l'inscripteur Boulitte. Pour vérifier ce fait, j'ai photographié une bille roulant sur la roche légèrement inclinée, et j'ai constaté que le mouvement qui s'inscrit est rigoureusement une ligne droite.

4. Granite d'Andlau, variété « Feuille morte » (fig. 8).

Pour les roches qui précèdent et qui sont peu élastiques et

Fig. 7 .— Marbre de Hauteville.

où, par conséquent, la bille ne rebondit qu'un très petit nombre de fois, il a été possible d'inscrire la totalité du phénomène sur une même plaque photographique. Il n'en est plus ainsi pour le granite ni pour les trapps. Afin de pouvoir observer la fin des rebondissements, je les ai photographiés

en vraie grandeur. Les inscriptions ne sont pas aisées à obtenir car la bille, rebondissant un très grand nombre de fois, se déplace peu à peu par suite des faibles aspérités qui subsistent dans le poli encore imparfait de la roche, et sort du champ d'inscription. Pour obtenir toute la série des rebon-

Fig. 8. — Granite d'Andlau « Feuille morte » (détail).

dissements, il faut inscrire par fractions en faisant tomber la bille de hauteurs initiales de plus en plus petites. Les courbes relatives au granite diffèrent notablement des précédentes et présentent des discontinuités. C'est là un cas particulièrement intéressant. Les discontinuités tiennent à l'hétérogénéité de la roche ; à ce que la bille dans ses chutes successives tombe sur des cristaux différents : feldspaths, quartz, etc..., dont les coefficients de restitution ne sont pas les mêmes. On

peut en conclure que les discontinuités que l'on constate pour des roches plus homogènes, à éléments plus petits, sont l'indice de défauts d'homogénéité.

5. Trapp de Netzenbach (fig. 9).

Pas plus que pour le granite d'Andlau, je n'ai pu obtenir les rebondissements sur une même plaque sensible ; il a été

Fig. 9. — Trapp de Netzenbach (fin des rebondissements).

nécessaire de fractionner l'inscription et de raccorder ensuite les différentes parties. Dans le cas présent, la bille est tombée successivement de 10, de 6 et de 4 cm. Pour chaque hauteur de chute j'ai répété l'expérience plusieurs fois afin d'obtenir une courbe moyenne. Les différentes courbes ont été ensuite raccordées, opération possible parce que j'avais toujours procédé de manière à réaliser un chevauchement des deux portions intéressées. D'après les inscriptions et en tenant compte des observations par visée directe, la bille rebondit 65 fois.

6. Trapp de Raon-l'Étape (fig. 10).

Même expérience. La bille est tombée de hauteurs initiales successivement égales à 10, 8, 6, 4 et 2 cm. Le raccordement

des portions de courbe a pu se faire de la même manière que précédemment. La bille rebondit en tout 140 fois, chiffre le

Fig. 10. — Trapp de Raon (fin des rebondissements).

plus élevé que j'aie atteint avec les échantillons soumis à l'expérience.

7. Acier trempé (fig. 11)[1].

A titre de comparaison, j'ai également photographié les

Fig. 11. — Acier trempé (détail).

rebondissements de la bille sur un bloc cylindrique d'acier

1. Cette pièce d'acier a été préparée par l'École nationale Technique de Strasbourg qui me l'a aimablement offerte.

trempé. Cet acier est encore trop mou et n'a pas un coefficient de restitution comparable à celui du trapp de Raon ; à la loupe on aperçoit sans peine les empreintes, très faibles il est vrai, qu'y laisse la bille. On compte cependant un nombre de rebondissements égal à 79 pour une hauteur de chute initiale de 100 mm.

Ces inscriptions ne peuvent pas être utilisées telles quelles pour l'étude des rebondissements. Elles donnent bien la hauteur qui peut être évaluée à l'aide de l'échelle de comparaison, mais pour avoir une représentation plus détaillée il convient d'étudier la loi du rebondissement en fonction du temps.

REPRÉSENTATION DES REBONDISSEMENTS EN FONCTION DU TEMPS

S'il était possible de polir parfaitement les roches de manière à empêcher les déplacements de la bille au cours des rebondissements, on pourrait inscrire le temps sur le cliché en se basant sur le déplacement uniforme de celui-ci. Il est à remarquer que le dispositif d'éclairage employé pourrait donner le temps d'une manière suffisamment exacte. En effet, la période du courant électrique utilisé est sensiblement de $\frac{1}{100}$ de seconde et l'image de l'arc électrique fournie par la bille s'inscrit non sous forme d'un trait continu mais d'une ligne pointillée, où deux maximums de lumière sont séparés par des intervalles de temps égaux à $\frac{1}{100}$ de seconde. Il suffit de compter le nombre des maximums de lumière — je l'ai fait dans un cas particulier (marbre) — pour en déduire le temps. Mais on peut aussi calculer ce temps en fonction des hauteurs de chute et de rebondissement parcourues. On néglige ainsi le temps pendant lequel la bille et la roche restent en contact, mais il est facile de se rendre compte que cette

valeur — calculée d'ailleurs par Hertz (10) — est infiniment petite par rapport aux erreurs expérimentales. Les courbes obtenues ainsi, représentées sur la fig. 12, ne constituent pas une représentation de la *trajectoire* de la bille, mais elles passent par les différents maximums atteints successivement par elle. Si la courbe représentative du mouvement de la bille est une fonction de la forme

$$\gamma = f(t)$$

les courbes tracées devront satisfaire à la relation

$$\frac{d\gamma}{dt} = 0.$$

En abscisses j'ai porté le temps écoulé entre deux rebondissements, en ordonnées la hauteur de rebondissement correspondante. Dans cette représentation graphique je n'ai pas fait le raccord entre les observations directes et les inscriptions, et ne me suis occupée que des cas où h est inférieur à 10 cm. Pour les trapps et l'acier, j'avais à ma disposition un grand nombre d'inscriptions obtenues avec des hauteurs de chute variées. Afin d'avoir toute la série des rebondissements, il a été nécessaire d'ajouter bout à bout les tronçons de courbe obtenus.

Ces courbes rendent bien compte de la décroissance des maximums atteints par la bille en fonction du temps, mais elles ne permettent pas de déterminer la loi qui régit la fréquence de ces maximums. Pour arriver à trouver cette loi, j'ai dressé des tableaux pour les roches étudiées : dans la première colonne est inscrit le numéro d'ordre du rebondissement, dans la seconde l'intervalle de temps qui le sépare du précédent, dans la troisième la hauteur en millimètres, dans la dernière enfin les valeurs de ε que l'on obtiendrait pour deux rebondissements successifs. A titre d'exemple, je donne ci-dessous le tableau correspondant au trapp de Raon.

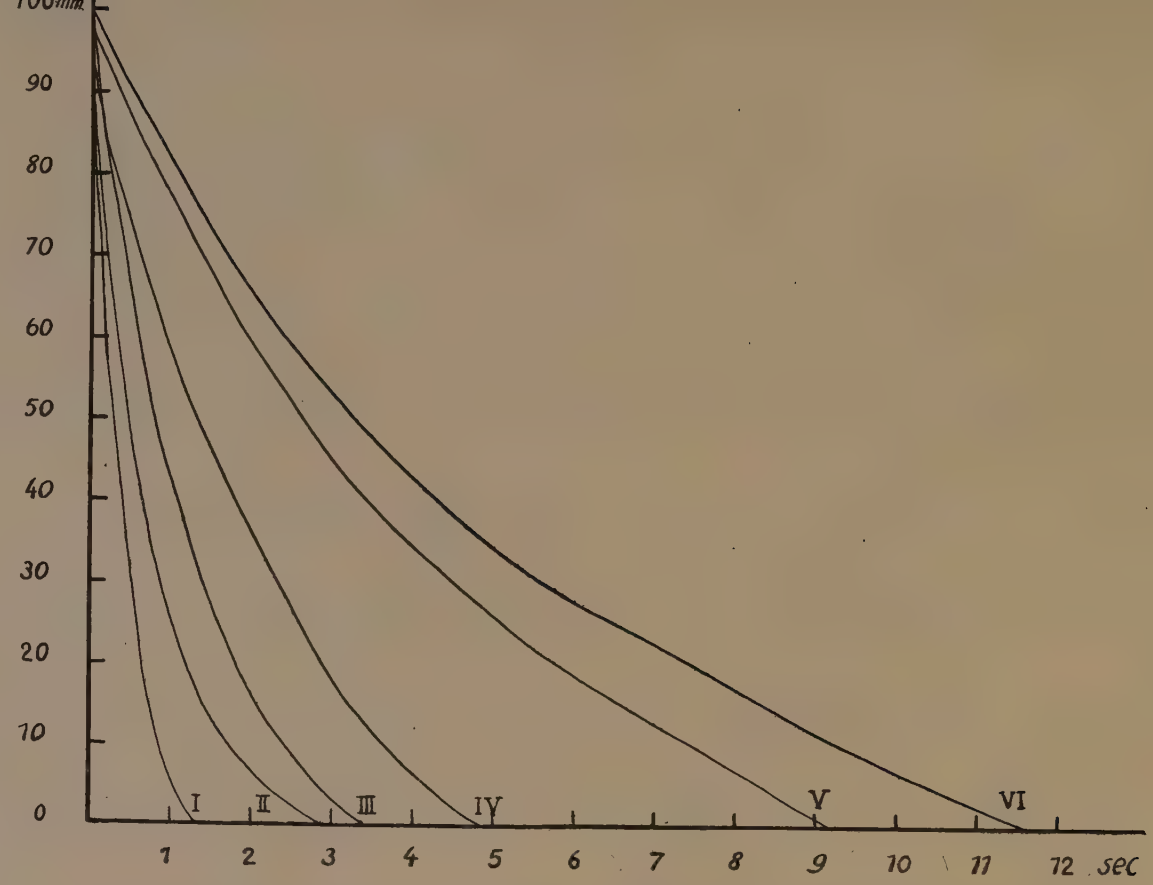


Fig. 12. — Décroissance des hauteurs de rebondissement en fonction du temps.
I. Marbre de Seravezza; II. Marbre d'Hydrequent; III. Marbre de Hauteville; IV. Trapp d'Andlau; V. Acier trempé; VI. Trapp de Raon.

TABLEAU I

Trapp de Raon-l'Étape

N° d'ordre des rebondissements	Hauteur de rebond.	Temps séparant deux maximums en sec.	ε	N° d'ordre des rebondissements	Hauteur de rebond.	Temps séparant deux maximums en sec.	ε
	458			20	158		
		0,596	0,953			0,355	0,990
1	416			21	151		
		0,572	0,965			0,348	0,980
2	388			22	145		
		0,549	0,955			0,341	0,982
3	354			23	140		
		0,528	0,970			0,335	0,978
4	333			24	134		
		0,511	0,965			0,328	0,981
5	310			25	129		
		0,495	0,972			0,321	0,980
6	293			26	124		
		0,482	0,974			0,315	0,983
7	278			27	120		
		0,468	0,969			0,309	0,979
8	261			28	115		
		0,454	0,974			0,303	0,978
9	248			29	110		
		0,442	0,969			0,297	0,981
10	233			30	106		
		0,430	0,976			0,291	0,981
11	222			31	102		
		0,420	0,979			0,286	0,985
12	213			32	99		
		0,411	0,976			0,280	0,974
13	203			33	94,5		
		0,401	0,975			0,273	0,976
14	193			34	90		
		0,392	0,979			0,266	0,972
15	185			35	85		
		0,384	0,981			0,259	0,973
16	178			36	80,5		
		0,378	0,986			0,252	0,971
17	173			37	76		
		0,373	0,985			0,245	0,973
18	168			38	72		
		0,366	0,979			0,239	0,971
19	161			39	68		
		0,360	0,990			0,233	0,981

N° d'ordre des rebondissements	Hauteur de rebond.	Temps séparant deux maximums en sec.	ε
40	65,5		
		0,228	0,977
41	62,5		
		0,223	0,975
42	59,5		
		0,217	0,976
43	56,7		
		0,212	0,979
44	54,3		
		0,208	0,978
45	52		
		0,204	0,975
46	49,5		
		0,200	0,981
47	47,7		
		0,196	0,982
48	46		
		0,192	0,978
49	44		
		0,188	0,982
50	42,5		
		0,184	0,982
51	41		
		0,181	0,981
52	39,5		
		0,178	0,980
53	38		
		0,175	0,983
54	36,7		
		0,172	0,983
55	35,5		
		0,168	0,978
56	34		
		0,165	0,985
57	33		
		0,162	0,981
58	31,8		
		0,159	0,984
59	30,8		
		0,157	0,987
60	30		
		0,155	0,986
61	29,2		
		0,153	0,988
62	28,5		
		0,151	0,982
63	27,5		
		0,149	0,985
64	26,7		
		0,146	0,983
65	25,8		
		0,143	0,984
66	25,0		
		0,141	0,983
67	24,2		
		0,139	0,979
68	23,2		
		0,136	0,978
69	22,2		
		0,133	0,984
70	21,5		
		0,131	0,979
71	20,6		
		0,129	0,990
72	20,2		
		0,127	0,983
73	19,5		
		0,125	0,979
74	18,7		
		0,122	0,978
75	17,9		
		0,119	0,980
76	17,2		
		0,117	0,979
77	16,5		
		0,115	0,981
78	15,9		
		0,113	0,981
79	15,3		
		0,111	0,977
80	14,6		
		0,108	0,979
81	14,0		
		0 105	0,974
82	13,3		
		0,103	0,977
83	12,7		
		0,101	0,984
84	12,3		
		0,099	0,971
85	11,6		
		0,097	0,978

N° d'ordre des rebondissements	Hauteur de rebond.	Temps séparant deux maximums en sec.	ε
86	11,1		
		0,095	0,981
87	10,7		
		0,093	0,976
88	10,2		
		0,091	0,985
89	9,9		
		0,089	0,985
90	9,6		
		0,088	0,989
91	9,4		
		0,087	0,989
92	9,2		
		0,085	0,989
93	9,0		
		0,084	0,978
94	8,6		
		0,083	0,976
95	8,2		
		0,081	0,975
96	7,8		
		0,079	0,967
97	7,3		
		0,076	0,965
98	6,8		
		0,073	0,962
99	6,3		
		0,070	0,959
100	5,8		
		0,067	0,956
101	5,3		
		0,065	0,954
102	4,8		
		0,063	0,979
103	4,6		
		0,061	0,955
104	4,2		
		0,059	0,976
105	4,0		
		0,057	0,974
106	3,8		
		0,055	0,973
107	3,6		
		0,054	0,986
108	3,5		
		0,053	0,984
109	3,4		
		0,052	0,985
110	3,3		
		0,051	0,984
111	3,2		
		0,050	0,984
112	3,1		
		0,050	0,983
113	3,0		
		0,049	0,983
114	2,9		
		0,047	0,965
115	2,7		
		0,045	0,962
116	2,5		
		0,044	0,959
117	2,3		
		0,043	0,955
118	2,1		
		0,041	0,951
119	1,9		
		0,039	0,946
120	1,7		
		0,037	0,939
121	1,5		
		0,035	0,966
122	1,4		
		0,034	1,000
123	1,4		
		0,033	0,963
124	1,3		
		0,032	1,000
125	1,3		
		0,032	0,980
126	1,25		
		0,032	1,000
127	1,25		
		0,032	0,980
128	1,2		
		0,031	0,979
129	1,15		
		0,030	0,978

N° d'ordre des rebondissements	Hauteur de rebond.	Temps séparant deux maximums en sec.	ε	N° d'ordre des rebondissements	Hauteur de rebond.	Temps séparant deux maximums en sec.	ε
130	1,1					0,023	0,926
		0,030	0,977	136	0,6		
131	1,05					0,021	0,913
		0,029	0,976	137	0,5		
132	1,0					0,019	0,894
		0,027	0,947	138	0,4		
133	0,9					0,016	0,790
		0,026	0,944	139	0,25		
134	0,8					0,013	0,894
		0,025	0,935	140	0,2		
135	0,7					0,006	—

Si l'on se reporte au tableau I, on voit de suite que le coefficient de restitution n'est pas une valeur constante et qu'il varie avec la hauteur de chute. J'ai représenté ces résultats sur un graphique en portant en abscisses la hauteur de chute en millimètres, en ordonnées la valeur de ε trouvée (fig. 13). On s'aperçoit immédiatement que pour toutes les substances étudiées, de propriétés élastiques nettement différentes, le coefficient ε croît quand h diminue, pour tendre vers 1 lorsque h tend vers 0. Pour des substances telles que les marbres de Hauteville et d'Hydrequent et pour les trapps de Raon-l'Étape et de Netzenbach, dont les coefficients de restitution sont très différents les uns des autres quand h est de l'ordre de 45 cm., il n'en est plus de même lorsque la bille ne tombe que de hauteurs voisines de 5 cm.

Ce fait n'est pas surprenant, car la fin des rebondissements n'a certainement plus de rapport avec le début. Non seulement des phénomènes de résonance peuvent se produire pour les très petites hauteurs de rebondissement, mais encore, quand les hauteurs de chute diminuent, on dépasse pour une certaine hauteur la limite des déformations permanentes. La bille agit comme un corps parfaitement élastique et l'on doit s'attendre à ce qu'à ce moment ε tende vers 1. Il semble qu'il se produise le phénomène suivant : ε part de 1 pour des hauteurs très petites (au-delà de la limite des déformations per-

manentes), puis il décroît, et à partir d'une certaine hauteur de chute sa valeur reste pratiquement constante et on obtient un rapport qui caractérise la roche. La décroissance sera d'autant plus longue que le coefficient ε définitif sera plus petit. Ainsi, pour le trapp de Raon, ε reste sensiblement constant à partir de 200 mm., tandis que pour le marbre de Hauteville cette décroissance de ε ne se ralentit qu'au delà de 350 mm. environ. Il est possible que, à des hauteurs de chute supérieures à 500 mm., on note des discontinuités analogues à celles constatées par Fréminville pour les aciers (9), mais ces discontinuités peuvent tenir à la production de fractures, de déformations de la bille, etc...

La courbe représentative de ε n'est plus très bien définie pour les très petites hauteurs, car les erreurs que l'on commet sur la mesure de h sont trop grandes :

$$\varepsilon = -\sqrt{\frac{h_1}{h_2}}$$

Comme dans ce cas h_2 est aussi variable :

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{2}\left(\frac{dh_1}{h_1} + \frac{dh_2}{h_2}\right)$$

h_2 et h_1 sont du même ordre de grandeur, donc

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} < \frac{dh_1}{h_1}$$

h_1 est mesuré sur le cliché, $dh_1 = 0{,}2$ mm. (en admettant que l'erreur commise sur l'évaluation de h comporte 0,1 mm. pour le maximum et le minimum de la courbe).

Pour $h_1 = 5$ cm. dans le cas du trapp de Raon par exemple, où $\varepsilon = 0{,}98$ (calculé), on aura

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} < \frac{0{,}2}{50} \text{ ou } 0{,}004 \quad d\varepsilon < 0{,}98 \,.\, 0{,}004$$
$$d\varepsilon < 0{,}004.$$

Quand la hauteur de chute diminue jusqu'à 1 cm., cette erreur augmente.

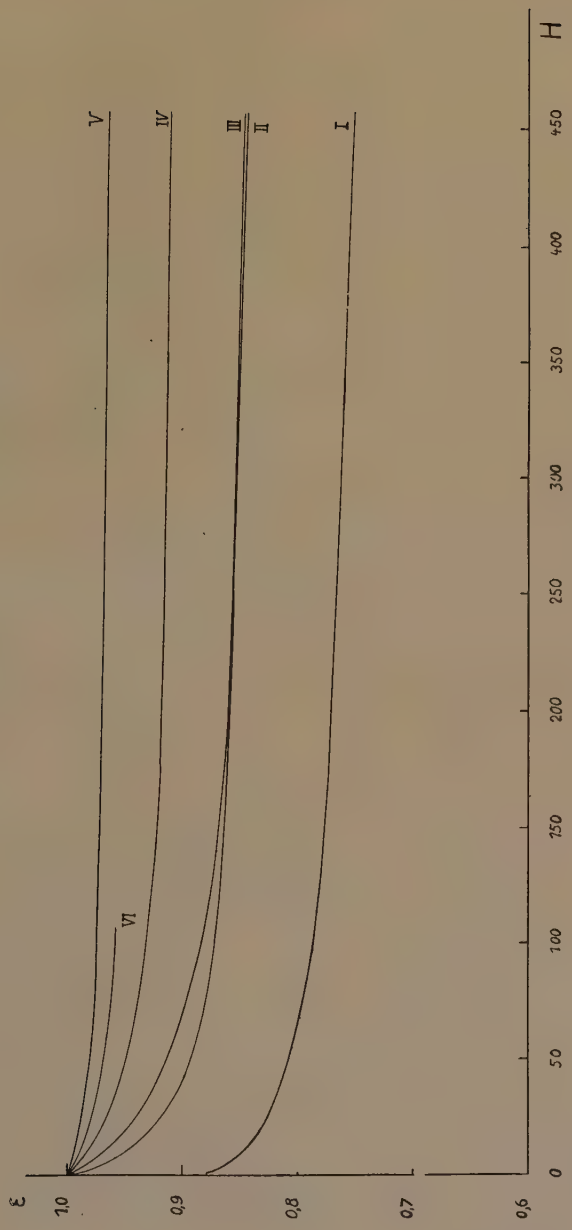


Fig. 13. — Courbe de ε en fonction de h.

Pour h = 1 cm. :

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} < \frac{0{,}2}{10} \text{ ou } 0{,}002 \quad d\varepsilon < 0{,}98 \,.\, 0{,}02$$
$$d\varepsilon < 0{,}02.$$

Cette étude détaillée n'a pas pu être faite pour toutes les roches. Un examen très rapide permet cependant de les différencier les unes des autres au point de vue de leurs propriétés élastiques. A cet effet j'ai simplement compté, comme m'y a engagée M. Rothé, le nombre de rebondissements dont la hauteur maximum est supérieure à 4 cm. J'ai choisi ce chiffre de 4 cm. parce qu'au-dessous de cette valeur on ne peut plus très bien séparer les rebondissements sans l'aide d'un appareil inscripteur. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant ; la classification des roches d'après leurs coefficients de restitution décroissants a été conservée pour l'établir. On remarque que, à part quelques divergences tenant au fait que cette classification rapide est bien plus simpliste que la première, le nombre des rebondissements décroît en même temps que ε. Cette conclusion ne doit d'ailleurs pas surprendre, car il existe certainement une relation simple entre ces deux valeurs.

TABLEAU II

Nombre de rebondissements d'une bille d'acier tombant de 458 mm. dont la hauteur dépasse 4 cm.[1].

Substances	Nombre de rebondissements	Nombre total des rebond. obtenus par l'étude complète
Trapp de Raon-l'Étape	51	140
Dacitoïde de Saint-Nabor	36 ± 1	

1. Lorsque l'erreur commise sur le nombre des rebondissements est inférieure à l'unité, elle ne figure pas sur le tableau. Quand elle est égale ou supérieure à 2, il ne s'agit plus d'erreurs de mesures mais de variations dans la composition de la substance étudiée. Pour certaines roches de composition peu homogène, il est possible de grouper les résultats autour de plusieurs valeurs moyennes ; dans ces cas, les valeurs ont été notées sur le tableau.

Substances	Nombre de rebondissements	Nombre total des rebond. obtenus par l'étude complète
Andésite de Schwarzbach	32 ± 2	
Dacite de Saint-Nabor	33 ± 2	
Andésite de Saint-Nabor	32 ± 2	
Rhyolite d'Eftermatten	28 ± 1	
Basalte de Riquewihr	22 ± 2 16 ± 1	
» 2e échantillon	14 ± 2	
Gabbro à olivine de Suède	27 ± 3	
Kersantite du Rosskopf	16 ± 1	
Monzonite du Hohwald	19 ± 1	
Ophite de Dax	22 ± 1	
Granite de Kruth	15 ± 2	
Granite d'Andlau « Rose de France »	19 ± 3	
Granite d'Andlau « Feuille morte »	19 ± 2	
Granite de Raon-l'Étape	21 ± 3	
Granite du Felsberg (Allemagne)	22 ± 6	
Gabbro de Suède	26	
Granite de Cornimont	13 ± 1	
Rhyolite du Rosskopf	24 ± 2 18 ±	
Trapp de Netzenbach	22	65
» 2e échantillon	22 17 ± 2	
Quartzite de Voegtlinshoffen	18 ± 1	
Minette de Saint-Nabor	14 ± 2	
Rhyolite du Rosskopf	11 ± 1	
Porphyre de Saint-Michel	9	
Diorite du Neuntenstein	16 ± 3	
Schiste calcareux à radiolaires (Schirmeck)	12	
Marbre de Hauteville (Ain)	9	39
Tuf dacitique de Saint-Nabor	11 ± 1	
Marbre Napoléon « Grand mélange »	10	39
Marbre Napoléon tigré « Pattes d'Alouettes »	11	
Marbre « Granite belge »	10	
Granite de Kagenfels	8 ± 1	
Cipolin à phlogopites de Sainte-Croix-aux-Mines	11 ± 1	
Grès argilo-micacé de Ribeauvillé	8	
Lunel rubané Notre-Dame	6	
Cipolin blanc de Sainte-Croix-aux-Mines	7	
Marbre de Seravezza	5	22
Marbre blanc d'Italie	4	
Calcaire oolithique à dendrites de Rosheim	4	
Asphalte de Lobsann	1	

CONCLUSION

De tout ce qui précède on peut conclure que le coefficient de restitution n'est pas constant pour toutes les hauteurs de chute. Si les mesures étaient faites pour de très petites hauteurs, il n'aurait donc aucune signification réelle et ne pourrait pas servir à caractériser une roche. Cependant, à partir d'une certaine hauteur, les différentes courbes se séparent. Si, à ce moment, on prend la précaution de faire toujours tomber la bille de la même hauteur (des variations de 5 à 10 cm. étant encore permises pour faciliter les mesures dans certains cas), ce coefficient exprime une propriété élastique de la roche et peut servir à la caractériser.

BIBLIOGRAPHIE

(1) Adams (F. D.) and Coker (E. G.), *An investigation into the elastic constants of rocks, more especially with reference to cubic compressibility* (Publ. of the Carnegie Institution, N. 46, 1906).

(2) Appell (P.), *Traité de mécanique rationnelle;* t. II : *Dynamique des systèmes* (Paris, Gauthier-Villars, 1911).

(3) Brinell und Dillner, *Die Brinellsche Härteprobe und ihre praktische Verwendung* (Congrès de Bruxelles, 1906).

(4) Brueil (P.), *Congrès international pour les essais des matériaux*, Copenhague, septembre 1909.

(5) Bücking, *Beiträge zur Geologie des oberen Breuschtals in den Vogesen* (Mitteilungen der geologischen Landesanstalt von Elsass-Lothringen, Strasbourg, XII, 1918-1920, 1).

(6) Castan (A.), *Mesure du module d'Young de quelques substances minérales par la méthode de percussion* (Publications du Bureau international de Séismologie ; série A : Travaux scientifiques, fasc. 6, p. 80).

(7) Delesse, *Sur les calcaires cristallins* (Bulletin de la Société géologique de France, 2e série, IX, 1852, p. 120).

— *Sur les calcaires cristallins et notamment sur les calcaires du gneiss* (Ibid., p. 133).

(8) Derville (P. H.), *Les marbres du calcaire carbonifère en Bas-Boulonnais* (Thèse Strasbourg, 1931).

(9) Fréminville (H. de), *Remarques sur les rebondissements d'une bille et les renseignements qu'ils peuvent donner sur la dureté et l'élasticité des corps* (Revue de Métallurgie, juin 1908, p. 329).

(10) Hertz (H.), *Ueber die Berührung fester elastischer Körper* (Journal für die reine und angewandte Mathematik, Berlin, 1882, p. 156).

(11) Jung (J.), *Contribution à la géologie des Vosges hercyniennes d'Alsace* (Mémoires du Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, Strasbourg, 1928).

(12) Kusakabe, *On the modulus of rigidity of rocks* (Publications of the Earthquake Investigation Committee in foreign languages, N. 14, Tokyo, 1903).

— *Modulus of elasticity of rocks* (Ibid., N. 17, 1904, p. 1).

— Ibid., N. 22, 1906, p. 27.

— *Modulus of elasticity of rocks and kinetic measurements of the*

modulus of elasticity for 158 specimens of rocks (Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, Vol. XX, Art. 9).

(13) Leet (Don L.) and Ewing (W. Maurice), *Velocity of elastic waves in granite* (Physics, Vol. 2, N. 3, March 1932, p. 160).

(14) Link, *Die Basalte des Elsass* (Mitteilungen der geologischen Landesanstalt von Elsass-Lothringen, Strassburg, 1888, p. 52).

(15) Love (A. E. H.), *Lehrbuch der Elastizität* (Autorisierte deutsche Ausgabe unter Mitwirkung des Verfassers besorgt von Dr. Aloys Timpe, Leipzig und Berlin, 1907).

(16) Michel-Lévy et Termier, *Sur les roches nommées trapp de la région de Raon-l'Étape* (Comptes-rendus, XXXII, 1923, p. 334).

(17) Marey (E.-J.), *Le mouvement* (Paris, 1894).

— *Les méthodes graphiques dans les sciences expérimentales* (Paris, 1878).

(18) Maurain (Ch.), Eblé (L.) et Labrouste (H.), *Sur les ondes sismiques des explosions de la Courtine* (Journal de Physique et le Radium, série VI, t. VI, mars 1925, p. 1).

(19) Nagoaka (H.), *Elastic constants of rocks and the velocity of seismic waves* (Philosophical Magazine, 1900, vol. 50, p. 53).

(20) Oddone (E.), *Determinazioni dinamiche del modulo di elasticità di Young delle roccie* (Annali dell'Ufficio Centrale meteorologico e geodinamico Italiano, vol. XXXIII, 1911, Parte I, fasc. III).

— *Déterminations dynamiques des modules d'élasticité de Young des roches* (Comptes-rendus de la Commission de l'Association internationale de Séismologie, Manchester, 1911, p. 237).

(21) *Recueil des constantes physiques* (Paris, Gauthier-Villars, 1931).

(22) R. G., *A propos des petits formats* (Revue française de photographie, t. III, 1932, N. 304, p. 246).

(23) Reich (H.), *Ueber die elastischen Eigenschaften von Gesteinen und damit zusammenhängende geologische Fragen* (Gerlands Beiträge zur Geophysik, Bd. XVII, 1927, p. 86).

(24) Rosenbuch, *Die Steiger Schiefer und ihre Kontaktzone an den Granititen von Barr, Andlau und Hohwald* (Abhandlungen der geologischen Landesanstalt Elsass-Lothringen, I, 1877).

(25) Rothé, Lacoste, Bois, Dammann (M^lle^) et Hée (M^me^), *Étude de la propagation de l'ébranlement des explosions de la Courtine. Comparaison avec l'explosion d'Oppau* (Publications du Bureau international de Séismologie. Série A, fasc. 1, p. 82).

(26) Schnaebelé, *Les granites du Champ du Feu (Vosges)* (Comptes-rendus, t. CXXXVI, 1923, p. 693).

(27) Schneider (J. J.), *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 24. September 1910.

(28) Shore, *An instrument for testing hardness* (American Machinist, November 1907).

— *Hardness in steel and its variation* (Ibid., Mai 1908).

— *The analysis of steel by mechanical means* (Ibid., Juli 1908).

(29) Thomson and Tait, *Treatise of natural philosophy* (Cambridge, 1903, p. 274).

(30) Zisman (W. A.), *A comparison of laboratory and seismologically determined constants of rocks* (Transactions of the American Geophysical Union, 14th annual meeting, April 1933, p. 287).

— *Elastic properties of rocks at and near the earth's surface and their relation to seismology* (Gerlands Beiträge zur Geophysik, vol. 39, 1933, p. 408).

ÉTUDE DES ONDES

PROVENANT DE SÉISMES ÉLOIGNÉS

On sait que la théorie de l'élasticité prévoit deux genres de vibrations pouvant se propager dans un corps solide : les ondes se propageant par compressions et dilatations successives, et les ondes de distorsion qui se propagent au contraire sans variations de volume. Les directions de vibration de ces deux ondes sont nettement différentes : la première vibre dans la direction du déplacement, d'où le nom d'onde longitudinale ; tandis que la seconde a non plus un axe, mais un plan de vibration, perpendiculaire en chaque point au sens de la propagation, d'où le nom d'onde transversale.

Ces deux ondes cheminent avec des vitesses différentes :

Si E est le module d'Young du solide en question, σ le coefficient de Poisson, ρ la densité, la vitesse des ondes longitudinales est :

$$V_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}$$

celle des ondes transversales

$$V_2 = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \sigma)}}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}}$$

or, comme on peut prendre pour tous les corps de la nature un chiffre moyen $\sigma = 0{,}25$:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{3}.$$

L'onde transversale, ou S, arrive donc après l'onde longitudinale, ou P. La plupart des auteurs qui ont essayé d'interpréter les séismogrammes et d'identifier les différentes ondes arrivant en une station donnée se sont basés sur ces différences de temps de propagation. La méthode est souvent très difficilement applicable, surtout lorsque ces ondes ont des temps de propagation presque pareils. On possède un élément de plus lorsqu'on connaît la direction de vibration de chacune d'entre elles : on peut alors attaquer le problème de manière inverse. C'est pourquoi M. Rothé m'a engagée à rechercher la nature du mouvement vibratoire, le sens et l'amplitude de la vibration, d'après les inscriptions des séismes sur les trois composantes EW, NS et verticale. On fait en somme une reconstitution de la vibration dans l'espace, le mouvement ayant été décomposé en trois composantes suivant des directions perpendiculaires : c'est donc une méthode de « recomposition », nom que j'utiliserai dans la suite.

Méthode d'étude

Considérons trois axes de coordonnées : ON projection du méridien, OE celle du parallèle, OZ la verticale en O. Soit OA la direction de l'épicentre dans l'espace. D'après les propriétés des deux mouvements vibratoires, le vecteur amplitude de l'onde longitudinale devra constamment être dirigé suivant OA pendant que le vecteur amplitude de l'onde transversale se trouvera dans un plan perpendiculaire à OA. D'où la méthode suivante (20) :

On détermine la grandeur et la direction de l'amplitude d'une vibration à un instant donné et on en déduit les projections sur un axe allant de la station à l'épicentre et sur un plan perpendiculaire à cet axe.

Prenons les trois axes de coordonnées choisis précédemment : ON, OE, OZ. En projection horizontale on aura les axes ON et OE. Soient OA, OB et OC les élongations vraies de l'onde en question à l'instant t, déterminées d'après les mesures sur les séismogrammes relatifs aux trois composantes. En projection horizontale, seules les valeurs OA et OB devront être considérées. Soit OA la direction de l'épicentre, α son azimut par rapport à la station, OΘ la direction perpendiculaire ; OΘ est l'intersection du plan horizontal avec le plan de vibration des ondes transversales.

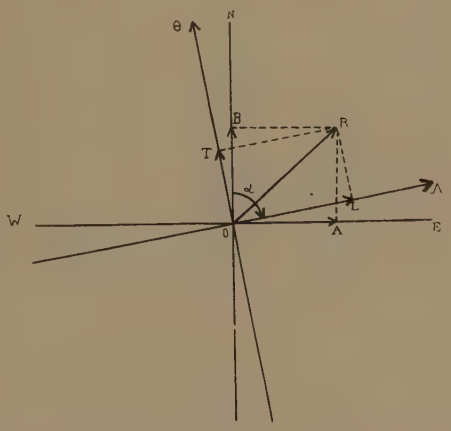


Fig. 1.

Soit OR le vecteur résultant de OA et de OB. Projetons OR sur OA et OΘ suivant OL et OT. En désignant par L et T les valeurs des projections, nous avons (fig. 1) :

$$\begin{cases} L = OA \sin \alpha + OB \cos \alpha \\ T = OA \cos \alpha - OB \sin \alpha \end{cases}$$

Comme les ondes longitudinales vibrent dans la direction de la trajectoire du rayon séismique, on devrait trouver que la résultante OR se confond avec OA et que la composante verticale a une valeur telle que le vecteur amplitude soit dirigé dans la direction même de l'épicentre. Mais comme d'une part les mesures sont entachées d'erreurs inévitables, que d'autre part des anomalies peuvent exister, on ne peut s'attendre à une correspondance parfaite ; on devra nécessairement trouver que la composante suivant OA, c'est-à-dire OL, est considérablement plus grande que celle suivant OΘ, soit

OT. Avant d'avoir recours à la composante verticale, on pourra déjà voir si l'on a bien affaire à une onde longitudinale. Le contraire doit se produire pour les ondes transversales. Pour les S, l'étude est plus compliquée par le fait qu'ici il ne s'agit plus de direction de vibration, mais d'un plan. Pour pouvoir situer le vecteur dans ce plan, la connaissance de la valeur de la composante verticale en grandeur et en signe est indispensable. En définitive, si on connaît le rapport $\frac{L}{T}$ et la valeur approximative de l'angle e (inclinaison du vecteur sur le plan horizontal), on pourra déduire si l'onde est longitudinale ou transversale.

Marche a suivre dans l'étude d'un séisme

En premier lieu il faut connaître l'épicentre avec beaucoup de précision ; c'est par la méthode de « déplacement de l'épicentre » qu'on arrive le plus sûrement à un résultat satisfaisant. Cette méthode a été utilisée pour la première fois par Mlle Y. Dammann (2) pour l'étude du tremblement de terre du Kan-sou du 16 décembre 1920. Elle consiste à faire varier d'une manière systématique la longitude et la latitude de degré en degré en calculant chaque fois par trigonométrie sphérique la distance de l'épicentre choisi aux différentes stations. L'épicentre étant déterminé, on calcule la distance épicentrale et l'azimut par rapport à une station considérée. Les calculs sont encore faits par trigonométrie sphérique pour atteindre le maximum de précision. Puis on mesure les élongations et les périodes sur les deux composantes horizontales pour tous les points intéressants des deux composantes (jusqu'à 10 ou 12 mesures par minute). Pour les composantes horizontales il est inutile de faire intervenir le temps de relaxation, du moins dans les cas que j'ai étudiés : les périodes des appareils diffèrent de quelques dixièmes de seconde seulement, les coefficients d'amortissement μ sont sensiblement nuls et les périodes des ondes inscrites sont les mêmes sur les deux composantes horizontales. Les diffé-

rences τ des temps de relaxation atteignent au maximum la demi-seconde, erreur négligeable.

Par contre il est absolument indispensable de calculer la différence entre le temps de relaxation relatif aux appareils horizontaux et au vertical pour pouvoir déterminer l'heure correspondante des mesures. Après avoir calculé le grandissement dynamique des trois appareils pour les périodes mesurées sur le séismogramme, on peut déterminer le déplacement vrai du sol à un instant donné.

Nous sommes alors en mesure d'étudier les directions et les amplitudes des vecteurs : projection en coordonnées horizontales des composantes EW et NS sur les deux axes définis plus haut, calcul de l'amplitude totale, de la projection horizontale de cette amplitude, calcul de $\frac{L}{T}$, de l'angle e (en grandeur et en signe). Après ces calculs, le vecteur peut être situé dans l'espace.

Causes d'erreurs. — La principale tient à la connaissance imparfaite de la période de la vibration. Les différentes ondes se superposent et il est très difficile de trouver la véritable période de l'onde considérée. Or la période a une double importance : elle intervient d'une part dans le calcul du temps de relaxation (cause d'erreur très grande dans le cas où les périodes propres des trois composantes sont différentes), d'autre part dans le calcul de l'élongation réelle. De plus, les périodes d'une même onde inscrite par les appareils NS, EW et V, correspondant à une résultante de diverses ondes composantes, ne sont pas toujours les mêmes et varient parfois du simple au double. Les résultats sont évidemment différents suivant que l'on adopte comme période de la vibration la valeur moyenne d'après les inscriptions dans les trois directions, ou qu'on introduise chaque composante avec la période correspondante. J'ai pu m'apercevoir au cours des différents essais qu'il est préférable dans les cas les plus défavorables de choisir comme période moyenne celle de la composante où l'inscription de l'onde se rapproche le plus de la

sinusoïde, c'est-à-dire là où l'onde en question est la moins perturbée. Une étude complète comporterait l'analyse de la vibration telle qu'elle a été indiquée par M. Labrouste (14).

L'influence de l'agitation microséismique n'est pas très grande. Elle ne se fait sentir en général que dans le cas des oscillations de faible amplitude, c'est-à-dire pour P et P'. Son influence est déjà presque négligeable pour PR_1, à condition que le séisme ne coïncide pas avec un jour de tempête microséismique. Ce cas s'est présenté pour l'un des tremblements de terre étudiés qui avait été inscrit par les appareils de la station séismologique de Kew. J'ai constaté que les résultats obtenus étaient complètement erronés ; aucune conclusion nette n'a pu être tirée de cette étude : sur 41 mesures, 38 indiqueraient qu'il s'agit d'ondes longitudinales, 3 seulement conduisent à des ondes transversales, dont 2 relatives à SR_1 et 1 à SR_2. Instruite par cet exemple, je ne me suis plus servie dans la suite que d'inscriptions de séismes correspondant à des journées où l'agitation microséismique était faible.

ONDES ÉTUDIÉES

Parmi les ondes étudiées, il y a lieu de distinguer deux catégories :

I) celles dont l'existence peut être dite certaine, parce qu'elle est basée sur les lois générales de l'élasticité ;

II) celles pour lesquelles on fait appel à des hypothèses diverses sur la constitution du globe, écorce ou noyau [1].

I. — Les ondes P et S dont j'ai indiqué la provenance peuvent se réfléchir une ou plusieurs fois à la surface du sol. C'est ainsi que prennent naissance les ondes suivantes : PR_1, PR_2, PR_3... SR_1, SR_2, SR_3, etc., dont les temps de propaga-

1. Dans ce qui suit je ne m'occuperai que des ondes P et S et de celles qui en découlent, et non des ondes de Love et de Rayleigh.

tion augmentent avec la distance. Ces réflexions ont lieu entre l'épicentre et la station sur l'arc SME (fig. 2). Il faudra, comme l'a fait Macelwane (18), également tenir compte, surtout pour les tremblements de terre éloignés, des réflexions s'effectuant le long de l'arc SNE et donnant lieu à la naissance des ondes PR'_1 (que je n'ai pas eu l'occasion de mettre en évidence), PR'_2 (qui a une grande amplitude pour les séismes provenant de la Nouvelle-Zélande), PR'_3, SR'_2, SR'_3.

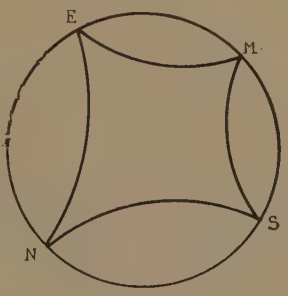


Fig. 2.

Ondes réfléchies complexes. — A côté de ces réflexions simples, on aura également celles où les P donnent lieu, après réflexion, à la formation d'ondes S ou inversement. Théoriquement, en effet, lorsqu'une onde incidente longitudinale ou transversale atteint une surface de discontinuité (ici la surface de la terre), elle donne naissance à quatre nouvelles ondes, deux ondes réfléchies — une longitudinale et une transversale — et deux ondes réfractées. La réfraction se produisant à la surface de la terre et de l'air, les deux ondes réfléchies sont seules intéressantes : la longitudinale et la transversale. Dans le cas des ondes longitudinales, il y a toujours deux ondes, mais pour les ondes transversales l'existence des ondes réfléchies est soumise à certaines conditions d'incidence.

La théorie générale de la réflexion permet d'établir des relations entre les vitesses de propagation et les angles d'incidence. Si V est la vitesse de l'onde incidente (longitudinale ou transversale), i l'angle d'incidence, a_1 et b_1 les vitesses de propagation d'une onde longitudinale et d'une onde transversale, i_1 et i_1 les angles d'incidence correspondants, on a (24) :

$$V = \frac{a}{\sin i} = \frac{a_1}{\sin i_1} = \frac{b_1}{\sin i'_1}$$

1er cas : l'onde incidente est longitudinale.

$$V = \frac{a}{\sin i} = \frac{a}{\sin i_1} = \frac{b}{\sin i'_1}$$

$$\sin i_1 = \sin i \text{ et } \sin i'_1 = \frac{b}{a} \sin i$$

Comme $\frac{b}{a} < 1$, les angles i_1 et i'_1 sont réels et on a une onde longitudinale telle que $i_1 = i$, et une onde transversale dont l'angle de réflexion satisfait à la relation : $\sin i'_1 = \frac{b}{a} \sin i$.

Par raison de symétrie, les vibrations de l'onde transversale sont contenues dans le plan d'incidence.

2e cas : l'onde incidente est transversale. Deux cas sont possibles :

a) L'onde incidente vibre parallèlement au plan d'incidence :

$$V = \frac{b}{\sin i} = \frac{a}{\sin i_1} = \frac{b}{\sin i'_1}$$

L'onde transversale existe toujours et $i'_1 = i$.

L'angle de réflexion i_1 de l'onde longitudinale doit satisfaire à la relation : $\sin i_1 = \frac{a}{b} \sin i$.

Aussi longtemps que $\frac{a}{b} \sin i < 1$, c'est-à-dire $\sin i < \frac{b}{a}$, i_1 est réel et une onde longitudinale réfléchie prendra naissance. Si $\sin i > \frac{b}{a}$, $\sin i_1 > 1$ et i_1 devient imaginaire : l'onde longitudinale ne peut plus se former.

b) L'oscillation a lieu perpendiculairement au plan d'incidence. Par raison de symétrie, il ne peut y avoir d'onde longitudinale réfléchie. Dans le cas d'une réflexion unique à la surface de la terre, on aura toujours PS et parfois SP. Si la terre était homogène ces deux ondes devraient avoir rigoureusement le même temps de propagation.

A PR_2 se relient PPS et PSS, les combinaisons SPP et SSP étant plus douteuses.

Une triple réflexion donnera naissance à une infinité d'ondes, dont les principales seront PPPS, PPSS, PSSS, etc...

Lorsque l'hypocentre du tremblement de terre est plus profond, d'autres ondes, analogues à PR_1, peuvent prendre plus d'importance : elles partent de l'hypocentre H, se dirigent vers la surface de la terre, s'y réfléchissent et arrivent à la station peu après les P ou les S (fig. 3). On les désigne par pP et sS. Elles ont été étudiées par différents auteurs, en particulier par Berlage (1), Scrase (26) et Stechschulte (27).

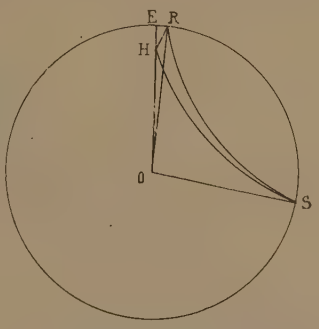


Fig. 3. — Hypocentre profond : ondes p P et s S.

II. — En plus de ces ondes, que j'appelle ondes « d'existence certaine », d'autres peuvent provenir des réflexions et des réfractions sur des surfaces de discontinuité. On admet l'existence d'un noyau dense ; théoriquement un grand nombre de cas doivent être pris en considération pour une onde ne subissant pas de réflexions (fig. 4).

Ils sont donnés dans le tableau suivant, dressé par Gutenberg (6) :

Onde			Nom	Remarques
Écorce	Noyau	Écorce		
P	P	P	P′	Onde longitudinale directe.
P	P	S	P_cP_cS	Même temps de propagation.
S	P	P	S_cP_cP	Même temps de propagation.
P	S	P	P_cS_cP	
S	P	S	S_cP_cS	
S	S	P	S_cS_cP	Même temps de propagation.
P	S	S	P_cS_cS	Même temps de propagation.
S	S	S	S′	Onde transversale directe.

L'indice c signifie que ces ondes ont atteint le noyau (*core*). Les ondes dont le sens de vibration était longitudinal à tra-

vers le noyau ont toutes été trouvées sur les séismogrammes, et leurs vitesses de propagation ont pu être déterminées. Au contraire l'existence des ondes transversales ayant traversé le noyau n'a pas pu être prouvée d'une manière certaine. La

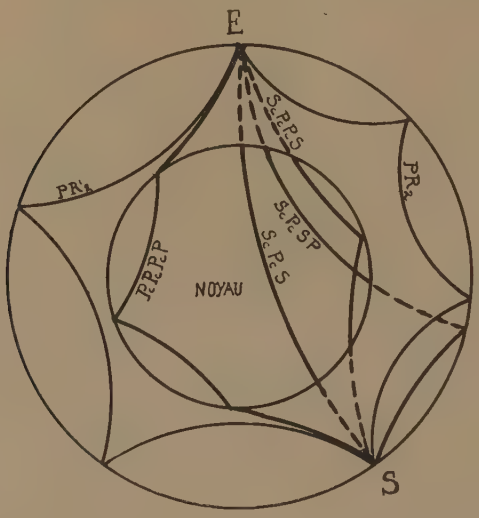


Fig. 4. — Schéma du trajet des ondes séismiques (d'après Gutenberg).

formation des ondes réfractées est soumise à des conditions d'incidence analogues à celles de la réflexion.

Les notations employées pour désigner ces ondes n'ont pas toujours été les mêmes. Gutenberg adopte, pour les vibrations longitudinales traversant le noyau, le symbole K ; il appelle, par exemple, SKS l'onde S_cP_cS, pour supprimer l'indice c.

Je n'entrerai pas dans les détails en ce qui concerne l'énergie plus ou moins grande que possèdent ces vibrations suivant les distances épicentrales, j'y reviendrai lorsque je les étudierai par la méthode indiquée ci-dessus.

Ondes réfléchies. — A côté des ondes dont il a été question jusqu'à présent et qui doivent être considérées comme des ondes directes, il en existe d'autres ayant subi des réflexions soit à la surface du sol, soit sur la surface de discontinuité entre le noyau et la croûte terrestre, soit encore sur une surface de discontinuité quelconque se trouvant à l'intérieur du globe. Il faut donc s'attendre à trouver un très grand nombre d'impétus sur les séismogrammes, correspondant à chacun de ces cas. Pour se rendre compte de l'extrême complexité de ce problème, il suffit de voir ce qui se passe lorsqu'il ne se produit qu'une seule réflexion sur le trajet de l'onde séismique. On peut passer en revue toutes les ondes du tableau précédent et faire intervenir une réflexion.

Parmi ces vibrations la plus importante est $\overline{S_cP_cSP}$; on observe souvent aussi $P_cP_cP_cP$, $\overline{S_cP_cP_cP}$ (= $P_cP_cP_cS$). On pourrait admettre l'existence de bien d'autres phases encore ; Macelwane (18) en cite trente-cinq dont il a calculé les temps de propagation.

A titre d'exemple et pour montrer combien il est difficile de trouver à quelle onde appartient une élongation mesurée sur les séismogrammes, j'ai recopié ci-dessous les heures d'arrivée (calculées) de ces différentes vibrations à De Bilt pour le tremblement de terre du 16 juin 1929, Nouvelle-Zélande, épicentre : 41°, 9 S, 172°, 5 E.

$\Delta = 18440$ km. Heure origine : $22^h\ 47^m\ 09^s$.

	h. m. s.		h. m. s.
P′	23 07 41	PR'_4	23 25 22
S_cP_cP	11 07	PS_cP_cS'	37
PR_1	12 42	PPPS	28 20
S_cP_cS	14 43	PPPS′	32 40
PR_2	16 21	SR_1	33 08
$S_cP_cP_cS$	19 01	SP_cS	56
PR_3	16	PPSS	34 40
PR'_2	38	SR'_1	37 34
$S_cP_cP_cS'$	21 07	PSSS	39 38
PR_4	32	SR_2	40
PR'_3	22 39	PPSS′	52
PS_cP_cS	23 01	Etc...	

TREMBLEMENTS DE TERRE ÉTUDIÉS[1]

3 juin 1929 : Timor Laoët, 7° S, 131° E, inscriptions fournies par les appareils de Strasbourg, réglés à la période de 12^{s} environ.

$\Delta = 12990$ km. et α (azimut) $= 68° 29'$

16 juin 1929 : Nouvelle-Zélande, 41°, 9 S, 172°, 5 E, inscrit par

	Δ	α
Pulkovo :	16760 km.	69° 22′
De Bilt :	18440	42° 20′
Uccle :	18660	47° 00′

28 janvier 1931 : Iles Carolines, 11° N, 143°, 5 E, inscrit par

	Δ	α
Kew :	12190 km.	38° 07′
De Bilt :	11530	43° 11′

2 février 1931 : Nouvelle-Zélande, 39° S, 177° E, inscrit par

De Bilt : $\Delta = 18410$ km., $\alpha = 44° 23'$

14 février 1934 : Formose, 17° 20′ N, 119° 22′ E, inscrit par

Strasbourg : $\Delta = 10050$ km., $\alpha = 62° 34'$

Afin de comparer les résultats obtenus avec ce qui se passe pour d'autres azimuts, j'ai également étudié le séisme du 16 juin 1929 des îles Sandwich (Antarctique), inscrit par les appareils de De Bilt :

Épicentre : 55°,8 S, 29°,7 W, $\Delta = 12400$ km., $\alpha = 200° 14'$

Tous les séismes ne se prêtent pas également bien à cette étude. Dans le choix des tremblements de terre à étudier, il faut veiller à écarter ceux dont les épicentres sont mal connus, les constantes des appareils peu sûres ou les impétus peu nets.

1. Pour cette étude, je ne me suis servie que d'inscriptions fournies par des appareils Galitzine.

RÉSULTATS

On peut classer ces premiers résultats en deux catégories : des vérifications de théories connues, d'autre part des observations nouvelles.

J'ai constaté que l'existence des ondes *simples*, c'est-à-dire de celles pour lesquelles il n'est pas nécessaire de faire intervenir des hypothèses sur la constitution de la terre, telles que P, PR_1, PR_2, S, SR_1, etc., peut toujours être prouvée. Là où seule une onde longitudinale doit exister, le vecteur résultant est bien dirigé dans le sens du rayon séismique. Par contre, dans le cas des ondes transversales, *un certain nombre de mesures* caractérisent cette vibration. Je dis bien « un certain nombre de mesures », car la vibration prépondérante dans tous les tremblements de terre que j'ai étudiés, à l'exception de celui de Formose, est la vibration longitudinale. Ce n'est qu'au moment de l'impétus et au plus 20 à 30 secondes après que l'on peut être sûr de trouver l'onde transversale, plus tard elle est étouffée par les ondes longitudinales. Il faudrait conclure de ces observations que dans beaucoup de cas l'énergie des ondes transversales est plus faible que celle des ondes longitudinales.

Les tableaux des pages suivantes sont des exemples d'études de séismes de différentes distances épicentrales. Pour l'un d'entre eux j'ai reproduit tous les calculs, de manière à pouvoir montrer la suite des opérations ainsi que l'approximation des résultats[1]. Pour les autres tremblements j'ai simplement donné les valeurs de L et de T, ainsi que de $\frac{L}{T}$ et e relatives à chaque vibration intéressante.

1. On trouvera en hors-texte la reproduction des inscriptions de ce séisme.

Tremblement de terre du 27 juin 1929

Iles Sandwich : 55°,8 S, 29°,7 W ; H. 0. : $12^h\ 46^m\ 52^s$.

Inscriptions des appareils Galitzine de la station séismologique de De Bilt, dont les constantes sont les suivantes :

	T_1 s.	l_1 mm.	A_1 mm.	T s.	μ	K	log C_1
Composante NS	24,43	123,13	1380	24,44	0,04	11,01	$\bar{2}$,4058
— EW	24,96	122,58	1380	25,31	—0,01	11,17	$\bar{2}$,3976
— V	12,0	405,9	1380	12,0	0,0	177	$\bar{3}$,7177

$\Delta = 12411$ km. et $\alpha = 200°14'$.

Heure h. m. s.	Tp s	EW μ	NS μ	V μ	Résultante R_h horiz. μ	R	L μ	T μ	$\frac{L}{T}$	e	Trièdre	Résultat
13 02 14	11	—1,6	—3,3	—6,4	3,66	7,37	—3,64	+0,38	9,6	—60°	—3	L
20	»	+3,2	+8,3	+15,2	8,89	17,62	+8,88	+0,13	68	+41°	+1	L
28	»	—1,6	—3,3	—9,6	3,66	10,28	—3,64	+0,38	9,6	—69°	—3	L
32	»	—3,2	—3,3	+3,2	4,6	5,6	—4,2	+1,5	2,8	—35°	—1	L
38	18	—3,2	—6,6	0	7,3	7,3	—6,19	+0,72	8,6	0°	±3	L
49	»	+3,2	+6,6	+15,3	7,3	16,9	—6,19	—0,72	8,6	+65°	+1	L
58	»	—3,2	—6,6	—19,9	7,3	21,2	—6,19	+0,72	8,6	—70°	—3	L
03 09	»	+1,6	+6,6	+16,8	6,8	18,1	+6,74	+0,76	8,9	+68°	+1	L
17	»	—1,6	—4,0	—21,4	6,2	22,2	—6,18	—0,55	11,3	—74°	—3	? L ou T
04 42	14	+1,5	—3,2	—3,9	3,4	5,2	—2,50	—2,50	1,0	—49°	—4	? L ou T
50	»	0	+1,6	+2,0	1,6	2,5	+0,55	+1,52	0,36	+51°	+1,2	L
58	»	—0,9	—3,2	—7,3	3,3	8,0	—3,31	—0,26	12,7	—66°	—3	L
05 06	»	+0,6	+3,2	+4,1	3,2	5,2	+3,20	+0,54	5,9	+52°	+1	L
23	»	+0,9	+3,2	+3,1	3,3	4,5	+3,31	+0,26	12,7	+43°	+1	L
28	»	—0,3	—3,2	—5,2	3,2	6,1	—3,10	+0,93	3,3	—58°	—3	L
06 41	»	+3,1	+3,8	+12,5	4,9	13,4	+4,63	—1,60	2,9	+70°	+1	L
47,5	»	—5,5	—24,7	—27	25,3	37,0	—25,0	—3,38	7,4	—47°	—3	L
54	»	+7,7	+19	+54	20,5	57,7	+20,48	—0,65	31,5	+69°	+1	L
58	»	+7,7	+20,6	—12,5	22,0	25,3	+22,0	—0,10	220	—30°	—1	L
07 13	16	—9,2	—19,2	+30	21,1	36,8	—21,2	+2,0	10,6	+55°	+3	L
23	»	+15,5	+28,8	+50	32,7	59,7	+32,4	—4,58	7,0	+57°	+1	L
30	»	0	—20,8	—52,5	20,8	56,4	—19,5	—7,19	2,7	—68°,5	—?	L
45	»	+4,6	+16	—10	16,6	19,4	+16,6	+1,22	13,6	—31°	—1	L
55	»	—6,2	—21,8	+7,5?	22,6	23,8	—22,60	—1,73	13,1	+18°,5	+3	L
08 01	17	+12,4	+29,2	+52,7	31,7	61,5	+31,56	—1,53	20,6	+59°	+1	L
08,4	»	—6,2	—22,7	—44,5	23,5	50,3	—23,44	—2,04	11,5	—62°	—3	L
19	»	+3,1	+19,5	+44,5	19,7	48,6	+19,37	+3,83	5,0	+66°,5	+1	L
26	»	—6,2	—19,5	—55,5	20,4	59,1	—20,44	—0,93	22,2	—68°	—3	L
09 03,1	10	+15,1	+17,2	+14,2	22,8	26,9	+21,35	—8,22	2,6	+32°	+1	L
10	»	—13,4	—15,5	—13,4	20,4	24,4	—19,18	+7,21	2,66	—33°	—3	L

Heure h. m. s.	Tp s	EW μ	NS μ	V μ	Résultante R_h horiz. μ	R	L μ	T μ	$\frac{L}{T}$	e	Trièdre	Résultat
13 09 14,5	»	+6,7	+6,9	+19,4	9,6	21,6	+8,79	—3,89	2,3	+64°	+1	L
10 02	12	+6,3	—12,9	—19,1	14,2	23,8	—9,92	—10,37	0,95	—53°	—4	T
09,3	»	+3,1	+9,7	+19,1	10,1	21,6	+10,2	+0,44	23,2	+62°	+1	L
16,5	»	—7,8	—19,4	—20,9	20,9	29,5	—20,89	+0,61	34,3	—45°	—3	L
23	»	+6,3	+16,3	+17,4	17,4	24,6	+17,48	—0,28	62,5	+45°	+1	L
52	»	+6,3	+16,3	+26,1	17,4	31,4	+17,48	—0,28	62,5	+57°	+1	L
59	»	—0,6	—12,9	—31,3	12,9	33,8	+62,31	—3,90	3,2	—67°,5	—3	L
11 06,2	»	+4,7	+9,7	+13,9	10,7	17,6	+10,73	—1,06	10,0	+52°	+1	L
33	16	+6,2	+16	+21,3	17,1	27,3	+17,15	—0,28	75	+51°,5	+1	L
41,5	»	—12,3	—19,2	—15	22,8	27,3	—22,24	+4,9	4,55	—33°	—3	L
50	»	+18,5	+12,8	+40	22,5	45,9	+18,40	—12,9	1,4	+61°	+1	L
57	»	—15,5	—11,2	—25	19,1	31,4	—15,87	+10,67	1,4	—53°	—3	L
12 08,3	14	+1,5	—15,8	—10,4	15,8	19,0	—14,31	—6,87	2,08	—33°	—4	?
14,7	»	0	+15,8	—6,2	15,8	16,9	+14,83	+5,46	2,7	—21°,5	—?	?
23,4	»	—7,7	—17,4	+18,7	19,0	26,6	—19,00	+1,20	15,8	+44°,5	+3	L
30	»	+6,1	+9,5	—29	11,3	31,1	+11,03	—2,44	4,5	—70°	—1	L
36	»	+1,5	—4,8	+22,9	5,0	23,4	+3,98	—3,07	1,3	+78°	+4	?
45,5	»	+3,1	+9,5	—18,7	10,0	21,2	+10,0	+0,37	27	—62°	—1	L
51	16	0	—9,5	+7,5	9,5	12,1	—8,92	—3,28	2,7	+38°	+?	?
54	»	+6,2	0	—8,7	6,2	10,7	+2,14	—5,81	0,37	—54°	—?	?
13 00	»	—6,2	—12,8	+7,5	14,2	16,0	—14,15	+1,39	10,0	+28°	+3	L
02	»	+18,5	+25,6	+21	31,5	37,9	+30,42	—8,51	3,5	+33°	+1	L
09	»	—15,5	—32	—27,6	35,5	45	—35,38	+3,47	10,5	—38°	—3	L
16	»	—3,1	—6,4	+20	7,1	21,2	—7,07	+0,70	10,0	+70°	+3	L
18	»	+6,2	—6,4	—5,0	8,9	10,2	—3,86	—8,02	0,48	—29°	—4	T
28	»	+6,2	+32	+8,7	32,7	33,7	+32,16	+5,26	6,1	+15°	+1	L
35	»	+6,2	—14,4	—12,5	15,6	20,0	—10,79	—11,38	0,9	—39°	—4	T
43	»	—6,2	+6,4	+15	8,9	17,4	+3,86	+8,02	0,48	+59°	+2	T
50	»	+9,2	—11,2	—7,5	14,5	16,3	—7,33	—12,50	0,58	+27°,5	—4	T
54	»	—7,7	+12,8	+3,8	14,9	15,4	+9,35	+11,64	0,8	+14°	+2	T
14 00	»	+3,1	—12,8	+10	13,1	16,5	—10,94	—7,33	1,2	+82°	+4	T?
04,6	14	+6,1	+6,3	—18,7	8,7	20,6	+8,02	+3,54	2,3	—66°	—1	L
15,6	»	+7,7	—12,6	—10,4	14,7	18,0	—9,19	—11,57	0,8	—35°	—4	T?
25	»	+1,5	+19	0	19,0	19,1	+18,35	+5,16	3,5	0°	±1	L
33	»	—18,4	—14,2	0	23,2	23,2	—19,68	+12,35	1,6	0°	±3	L
37	16	+3,1	—3,2	+7,5	4,4	8,7	+1,93	—4,01	0,48	+60°	+4	T
53	»	+30,9	—16	+17,5	34,8	38,9	—4,33	—34,53	0,12	+27°	+4	T
15 05,6	19	—42,5	+20,4	+13,5	47,1	49,0	—4,44	—46,95	0,09	+16°	+2	T
08,9	»	+1,6	—22,0	+3,4	22,0	22,3	—20,09	—9,11	2,2	+9°	+4	?
24,4	»	+4,9	+13,6	—33,7	14,4	36,6	+14,45	+0,10	144	—67°	—1	L
37,5	»	—4,9	—20,4	—23,6	20,9	31,6	—20,79	—2,45	85	—48°	—3	L
54,5	»	+9,8	+8,5	—33,7	12,9	34,7	+11,36	—6,25	1,8	—69°	—1	L
16 04,8	12	—9,4	—16,3	—13,9	18,8	23,4	—18,55	+3,18	5,8	—36°	—3	L
11,6	»	+14,5	+17,8	+20,9	22,9	31,0	+21,57	—7,08	3,0	+43°	+1	L
15,4	»	—12,5	0	—14,8	12,5	19,3	—4,32	+11,73	0,37	—50°	—?	T
21	»	+31,4	+32,3	+5,2	45,0	45,3	+41,17	—18,29	2,2	+6°	+1	L
28	»	—12,5	+3,3	—12,2	12,9	17,7	—1,32	+12,93	0,10	—44°	—2	T
32	»	+31,4	+32,3	—56,5	45,0	72,1	+41,17	—18,29	2,2	—51°	—1	L

Résultat : $S_c P_c P_c S$ (13 28 » à 13 43 ») ; S (14 53 » à 15 05,6 19) ; PS? (16 04,8 12 21 »)

Heure h. m. s.	Tp s	EW μ	NS μ	V μ	Résultante R_h horiz. μ	R	L μ	T μ	$\frac{L}{T}$	e	Trièdre	Résultat
13 16 44	»	—66	—126	—71	142	158,9	—140,00	+18,35	7,6	—27°	—1	L
48,5	14	+3,1	+53,5	+11,9	53,6	130	+51,27	+15,59	2,8	+66°	+1	L
57	»	—20	—45,8	—52	49,9	72,2	—49,88	+2,92	17,0	—46°	—3	T
17 00	»	+46	+63	—93,5	78,0	121	+75,12	—21,36	35	—51°	—1	T
07,5	11	—15	—60	+64,5	61,8	89,3	—10,81	—6,68	1,6	+36°	+3	T PPS
13	16	+46,3	+13,5	—62,5	48,2	78,9	+28,67	—38,77	0,73	—53°	—1	T PPPS
24,4	»	—9,2	—57,5	+62,5	58,2	85,4	—57,13	—11,23	5,1	+47°	+3	L
34	»	—43,2	+3,2	—82,7	43,3	93,3	+1,51	+5,15	0,29	—62°	—2	T
41	»	—27,8	—83	—8,7	87,5	87,9	—87,49	—2,62	33,4	—6°	—3	L
49	»	+43,2	+99	+30	108	112	+107,83	—6,26	17,2	+36°	+1	L
18 00	»	—24,7	—90	—25	93,3	96,6	—93,0	—7,95	11,7	—15°	—3	L
12	24	+19,1	+64	—32,6	66,8	74,3	+66,65	+4,22	15,8	—26°	—1	L
22	»	+7,6	—40	+21,8	40,7	46,2	—34,90	—20,96	1,2	+28°	+4	T?
34	»	+22,9	+56	+130	60,5	143	+60,46	—2,12	28,6	+65°	+1	L
42	»	—30,6	—36	+21,8?	47,2	52,0	—44,37	+16,26	2,7	+25°	+3	L
48	»	+38,2	+36	—43,5?	52,5	68,1	+47,0	—23,4	2,0	—40°	—1	L
57	»	+19,1	+56	+65,2	59,1	88,1	+59,14	+1,45	41,0	+48°	+1	L
19 05,7	20	—3,3	—70	+18,6	70,0	72,5	—66,84	—21,11	3,1	+15°	+3	L
19	»	—10	0	+7,4	10,0	12,4	—3,45	+9,38	0,37	+36°	+?	T
24	»	—23,4	—42	+37,1	48,0	60,7	—47,49	+7,42	6,4	+38°	+3	L
32	»	+53,5	+70	—24,2	88,1	91,3	+84,18	—25,99	3,2	—15°	—1	L ?
20 10	»	+13,4	—35	+18,6	37,5	41,8	—28,20	—24,67	1,1	+27°	+4	T
24	14	—6,1	+22	+20,4	22,8	30,6	+18,53	+13,33	1,4	+42°	+2	T
30	»	+23	—9,5	—9,3	24,9	26,5	—0,97	—24,86	0,04	—20°	—4	T
34	»	+21,5	+19	+10,4	28,7	30,5	+25,26	—13,60	1,8	+20°	+1	L
44	»	—9,2	—9,5	—31,2	13,2	33,9	—12,09	+5,35	2,3	—67°	—3	L
48	»	+15,7	+22	+37,4	27,0	46,1	+26,07	—7,13	3,6	+55°	+1	L
58	»	+30,7	—12,5	—22,8	33,1	40,2	—1,12	—33,12	0,03	—35°	—4	T ?
21 05,8	»	—24,6	—9,5	+8,3	26,3	27,6	—17,4	—19,8	0,8	+17°	+3	T
13,4	18	+12,7	+33	—18,4	35,3	39,8	+35,35	—0,51	70	—27°	—1	L
24	»	—19,1	—61,2	+46	64,1	78,9	—64,02	—3,25	19,8	+36°	+3	L
31,5	»	+8,0	+30	—42,8	31,1	52,8	+5,57	+2,88	1,9	—55°	—1	L
42	»	—12,7	—28,2	—18,4	30,9	36,0	—22,07	+9,97	2,3	—31°	—3	L
55	»	—19,1	+46,3	+24,5	50,1	55,7	+36,85	+33,94	1,1	+26°	+2	T
22 17,5	32	+70	—58	—155	90,9	180	—30,22	—68,68	0,44	—60°	—4	T SR_1
37	»	—135	+37,5	—75	140	158	—11,51	+139,6	0,08	—57°	—2	T
56	»	—270	—830	—42,8	872	873	—685,4	—108,1	6,3	—3°	—3	L
23 05	34	+400	+853	—25	942	942	+988,7	—80,3	12,4	—2°	—1	L
36	»	—313	—475	+182	567	597	—553,9	+129,5	4,3	+18°	+3	L
47	»	+289	+488	+250	567	619	+557,9	—102,4	5,5	+24°	+1	L
24 06	20	—114	—160	—11,2	196	196	—189,6	+51,7	3,7	—3°	—3	L
20	»	—3,3	+62,8	0	62,8	62,8	+57,8	+24,8	2,3	0°	±2	T?
40	»	+33,4	—38,4	+24,1	50,9	56,3	—24,4	—44,6	0,55	+26°	+4	T
48	»	—33,4	+52,4	0	62,1	62,1	+37,6	+49,5	0,76	0°	±2	T $S_eP_eP_eS'$
25 04	36	+13	—140	+29	140	143	—126,8	—17	7,5	+11°	+4	?
16	»	—110	+98	—21,8	147	149	+25,11	+137,2	0,38	—9°	—2	T
29	»	+104	+105	—145	147	207	+134,49	—61,27	2,2	—45°	—1	L
40	»	—32,4	—91	+58	96,5	112	—96,58	—1,07	90	+31°	+3	L

Heure h. m. s.	Tp s	EW μ	NS μ	V μ	Résultante R_h horiz. μ	R	L μ	T μ	$\frac{L}{T}$	e	Trièdre	Résultat
13 25 48	»	—65	—24,5	—87	69,4	111	—45,48	+52,5	0,86	—51°	—3	T
58	»	—97	—133	—145	164	219	—158,3	+45,0	3,5	—41°	—3	L
26 20 38	»	+142	+240	—133	279	309	+274,3	—50,2	50,5	—26°	—1	L
29,4	»	—370	—147	0	398	398	—266,0	+296,4	0,90	0°	+3	T
38	»	+270	+61,7	—85,5	277	289	+151,3	—232	0,65	—17°	—3	T
50	»	—107	—363	+300	378	483	—377,6	—25,2	15	+39°	±3	L
27 02	»	+249	+540	—250	594	645	+616,7	—248	2,5	—20°	—1	L?
20	»	—278	—378	—267	469	540	—450,8	+130,1	35	—30°	—3	L
40	24	+172	+220	—125	279	306	+265,8	—85,4	3,1	—24°	—1	L SR_2?
55	»	—199	—253	+109	321	340	—306,2	+99,2	3,1	+19°	+3	L?
28 05,3	34	+148	+222	0	266	266	+259,5	—62,3	4,1	0°	±1	L?
24,5	»	—165	—95	+87,5	190	209	—146,1	+122,0	1,2	+25°	+3	L?
41	»	+100	+88,5	+150	133	200	+117,6	—63,2	1,8	+48°	+1	L?
56	»	+35,4	—165	+25?	168	—	—142,6	—90,2	1,6	+9°	+4	L?
29 05	»	—70,8	+121	+150	140	205	—89,1	+108,3	0,82	+47°	+2	T
22	»	+17,7	—159	+62,4	160	171	—143,1	—71,6	2,0	+21°	+4	L?
40	»	+59	+178	0	187	—	+187,4	+6,2	30,0	0°	+1	L
57	»	—226	—197	+212	300	367	—263	+144	1,8	+35°	+3	L?

Tremblement de terre du 16 juin 1929

Nouvelle-Zélande : 41°,9 S, 172°,5 E.

Destructeur, ressenti dans toute l'île : le degré IX a été atteint dans la région Nord de l'île du Sud.

Inscriptions des appareils Galitzine de la station séismologique de Pulkovo, dont les constantes sont les suivantes :

	T_1 s	l_1 mm.	A_1 mm.	T s.	μ	K
Composante NS	13,7	124	1383	14,8	+0,01	93
— EW	13,7	124	1354	13,4	—0,04	92
— V	13,2	408	1365	14,0	+0,01	248

$\Delta = 16760$ km. et $\alpha = 69°22'$.

Heure h. m. s.	To s	EW μ	NS μ	V μ	Résultante R_h horiz. μ	L μ	L μ	$\frac{L}{T}$	e	Trièdre	Résultat
23 07 21	15	+11,6	+4,5	—27,7	12,4	+12,43	+ 0,13	95	—66°	+1	L
30	»	—20	—6,7	+55,5	21,1	—21,1	—0,7	30	+69°	+3	L
37	»	+11,6	+5,4	—52	12,8	+12,75	+1,9	6,7	—76°	—1	L
45	»	—12,6	—4,5	+36	13,4	—13,4	+0,21	63	+69°,5	+3	L
Rien entre $23^h\ 08^m$ et $23^h\ 10^m$											
10 50	16	—11,42	—6,77	+33,5	13,2	—13,1	—2,3	5,7	+68°,5	+3	L
57	»	+24	+7,75	—5,9	25,2	+25,1	—1,2	21,0	—67°	—1	L
11 12	»	—16	—2,9	+26,8	16,2	—15,9	+2,9	5,5	+66°,5	+3	L
16	»	+13,7	+1,9	—49,5	13,8	+13,5	—3,1	4,35	—74°	—1	L
22	»	—6,9	+5,8	+24	9,0	—4,41	+7,85	0,56	+69°,5	+2	T
35	»	+13,7	+5,8	—28	16,8	+14,84	+0,59	25,2	—59°	—1	L
44	»	—11,4	+0,9	—24	11,4	—10,3	+4,85	2,12	—65°	—2	L
Rien entre $23^h\ 12^m$ et $23^h\ 14^m$											
14 20	16	—15,4	—5,8	+25,4	16,4	—16,4	0,00	∞	+57°	+3	L	S_cP_cS?
26	»	+26,3	+5,8	—47	27,0	+26,6	—3,8	7,0	—60°,5	—1	L	
34	»	—18,3	—3,87	+33,4	18,7	—18,5	+2,8	6,6	+61°	+3	L	
45	»	+15,4	+1,9	—13,4	15,5	+15,1	—3,6	4,2	—41°	—1	L	
52	»	—12,6	+2,9	—4,0	13,0	—10,8	+7,1	1,5	—17°	—2	T	
16 09	»	—5,7	+6,3	+2,7	8,5	—3,12	+7,9	0,40	+18°	+2	T	
18	»	+4,6	—4,35	+8,0	6,4	+2,8	—5,7	0,49	+51°	+4	T	$S_cP_cP_cS$?
22	»	—3,4	+2,9	—8,0	4,4	—2,2	+3,9	0,56	—61°	—2	T	
31	»	—1,4	+3,9	+12	4,1	+0,06	+4,14	0,01	+71°	+2	T	
34	»	—1,4	—1,9	—8,7	2,3	—0,64	+2,27	0,03	—75°,5	—3	T	
44	»	+2,3	+4,35	+13,4	4,0	+3,68	+3,26	1,13	+73°,5	+1	L	
50	»	+3,4	—1,9	—6,7	4,0	+2,51	—2,97	0,81	—59°	—4	T	
57	»	—8,0	+5,8	+9,3	9,3	—5,46	+8,24	0,66	+45°	+2	T	
17 38	»	—5,7	+4,35	+5,35	7,2	—3,8	+6,1	0,62	+37°	+2	T	
45	»	+16,5	+2,9	—12	16,7	+16,4	—3,1	5,3	—36°	—1	L	
53	»	—10,3	+1,9	+17,4	10,4	—8,97	+5,4	1,7	+59°,5	+2	L	
18 09,5	20	+17,7	+2,7	—44,3	17,9	+16,35	—3,7	4,4	—68°	—1	L	
16	»	—12,8	—5,3	+22,6	13,8	—13,8	+0,45	30,6	+59°	+3	L	
29	»	+14,4	+6,6	+9,4	15,8	+15,8	—1,1	14,4	+31°	+1	L	
35	»	—17,7	—10,6	+17	20,6	—20,2	—3,6	5,6	+39°,5	+3	L	
19 12	12	+2,7	+3,5	—1,6	14,0	+3,75	+2,32	1,62	—6°,5	—1	L	
18	»	+2,0	—3,5	—1,6	4,0	—0,64	—3,97	0,16	—22°	—4	T	
24	»	—3,36	+6,7	0	7,5	—0,8	+7,5	0,11	0°	2	T	S directs?
28	»	0	—2,9	+5,5	2,9	—	—	—	—	—		
35	»	+3,36	+2,92	—1,6	4,4	+4,2	+1,6	2,6	—20°	—1	L ou T	
48	»	—3,36	—4,1	+10,3	5,3	—4,6	—2,6	1,7	+63°	+3	L	
20 35	14	—6,8	—11,7	+14	13,6	—10,5	—8,5	1,23	+46°	+3	L	
42	»	+13,1	+6,65	—19	14,7	+14,6	+1,61	9,0	—52°	—1	L	
49	»	—14,1	—4,15	—11,4	14,7	—14,7	+1,1	13,4	—37°	—3	L	
55	»	+12,1	+2,5	+14,6	12,3	+12,2	—1,9	6,4	+50°	+1	L	
21 00	16	+5,7	+6,8	—20,0	8,8	+7,72	+4,35	1,8	—66°,5	—1	L	
11	»	+17	—19,4	—14,7	25,8	+9,1	—24,1	0,38	—30°	—4	T	
16	»	—13,7	+18,9	+16,0	23,3	—6,14	+22,5	0,27	+34°,5	+2	T	PS_cP_cS'
25	»	+14,8	—5,3	—14,7	15,7	—12,0	—10,2	1,17	—43°	—4	L ou T	

Heure h. m. s.	To s	EW μ	NS μ	V μ	Résultante Rh horiz. μ	L μ	T μ	$\frac{L}{T}$	e	Trièdre	Résultat
23 21 34,5	»	—35,4	—2,9	+16	35,5	—32,11	+15,2	2,1	+24°,5	+3	?
40	»	+31	+2,9	—9,3	31,1	+29,0	—10,9	2,7	—17°	—1	L?
48,5	»	—17,3	—1,0	+10,7	17,3	—16,5	+5,2	3,2	+32°	+3	L? $S_cP_cP_cS'$
54	»	+28	—2,9	—12	28,1	+25,2	—12,6	2,0	—23°	—4	L?
22 00	»	—11,4	—1,0	+4,0	11,4	—10,9	+3,1	3,5	+19°,5	+3	L?
04	20	+23,3	—13,3	—19	26,8	—14,4	—20,6	0,70	—35°,5	—4	T
20	»	—24	—5,3	—1,9	24,6	—24,3	+3,5	7,0	—4°	—3	L
27	»	+21	+8,0	—7,5	22,5	+12,5	+0,08	156	—18°,5	—1	L
42	»	—19,3	—5,3	+19	20,0	—19,9	+1,84	10,0	+43°,5	+3	L
48	»	+12,4	+8,0	—19	14,7	+14,4	+3,1	4,6	—52°,5	—1	L
53	»	—12	+1,3	+32	12,0	—10,8	+5,45	2,0	+69°,5	+2	L
59	»	+25,7	—4,65	+17	26,0	+22,4	—15,7	1,43	+33°	+4	L
23 00	14	+16,5	+3,3	—4,5	16,8	+16,6	—2,7	6,15	—15°,5	—1	L
08	16	—16	—1,9	+8,7	16,1	—15,6	+3,9	4,0	+28°,5	+3	L
14	»	+9,2	—3,9	+1,3	9,9	+7,2	—6,9	1,04	+7°,5	+4	L
33	»	+6,8	+7,7	—12	10,2	+9,1	+4,8	1,9	—50°	—1	L
40	»	—20,6	—10,8	—16	23,2	—23,1	—2,8	8,2	—35°	—3	L
45	»	+55	+17,4	0	57,7	+56,6	—3,1	18,3	0°	1	L
56	»	—43,5	—16,5	+4	34,1	—42,5	—0,11	390	+7°	+3	L
24 04	»	+24	+13,5	—8	27,5	+27,2	+4,2	6,5	—16°	—1	L
14	»	—25	—2,9	—18,7	25,1	—24,4	+6,1	4,0	—36°,5	—3	L
20	»	+24	+6,8	+29,4	24,9	+26,3	—2,1	12,5	+50°	+1	L
36	»	—10,3	+7,75	+9,35	12,9	—6,9	+10,9	0,63	+36°	+2	T
25 22	18	—18,3	—4,5	0	18,8	—18,7	+2,2	8,5	0°	3	L } PPPS
24	»	+50	+17	—1,6	52,8	+52,4	—1,7	30,8	—2°	—1	L }
34	»	—37,7	—14,7	+40	40,3	—40,5	—0,45	90	+44°,5	+3	L
42	»	+28,5	+2,2	—40	28,6	+27,4	—8,0	3,4	—54°,5	—1	L
54	»	—18,3	+10,2	+20,7	21,0	—13,5	+16,0	0,84	+45°	+2	T
26 00	»	+14,8	—3,4	—20,7	15,2	+12,6	—8,4	1,5	—53°,5	—4	L
11	»	—22,8	+12,5	+19	26,0	—16,9	+19,7	0,86	+36°	+2	T
15	»	+25	+5,65	—12,7	25,6	+25,4	—3,5	7,2	—27°	—1	L
20	»	—10,3	—2,2	—23,8	10,5	—10,4	+1,6	6,5	—66°	—3	L
24	»	+9,1	—3,4	+11,1	9,7	+7,4	—6,4	1,16	+49°	+4	L? } PS_cP_cS'
34	»	—17	+3,4	+15,6	17,4	—14,7	+9,2	1,6	+42°	+2	L? }
41	»	+27,4	—5,65	—4,7	28,0	+23,6	—14,9	1,6	—10°	—4	L?
58	»	—18,3	+4,5	—30	18,8	—15,5	+10,7	1,45	—58°	—2	L?
27 05	»	+27,4	+13,6	+16	30,5	+30,4	+3,1	9,8	+27°,5	+1	L
16	»	—21,7	—5,6	+20,7	22,4	—22,3	+2,4	9,3	+42°,5	+3	L
30	»	+9,1	+5,6	—17,5	10,7	+10,5	+2,0	5,2	—59°	—1	L
43	»	—4,5	+6,8	+4,7	8,1	—1,8	+7,9	0,23	+30°,5	+2	T SR_1
Rien de 23h 28m à 23h 30m											
30 04,7	11	+14,3	+8,4	—1,9	16,5	+16,36	+2,8	5,8	—6°,5	—1	L
16	»	—15,9	—18,9	+13,3	24,7	—21,54	—12,1	1,78	+28°,5	+3	L
28	»	+15,1	+15,4	+8,4	21,6	+19,5	+9,1	2,14	+21°,5	+1	L SPS
36	»	—9,6	—11,9	—18,8	15,3	—13,2	—7,8	1,7	—51°	—3	L PPSS
50	»	+4	+17,8	+23,4	18,2	+10,0	+15,2	0,66	+52°,5	+1	T
31 03,4	»	+25,4	—18,2	—28,2	31,2	+17,4	—28,0	0,62	—42°	—4	T

Heure h. m. s.	To s	EW μ	NS μ	V μ	Résultante R_h horiz. π	L μ	T μ	$\frac{L}{T}$	e	Trièdre	Résultat	
23 31 17,5	»	—10,3	+17,5	+14,1	20,3	—3,4	+20,0	0,17	+35°	+2	T	
24	»	+2,4	—27,2	—19,7	27,3	—7,3	—26,3	0,28	—36°	—4	T	
37	»	+28,6	+21	—9,4	35,5	+34,2	+9,6	3,5	—15°	—1	L	
45	»	—25,4	—18,2	+17,8	31,3	—30,2	—8,1	3,7	+30°	+3	L	
33 18	24	+94,5	+31,6	—21,3	99,6	+99,5	—3,7	27	—12°	—1	L	
32	»	—6,9	—10,1	+18,6	12,2	—10,0	—7,0	1,43	+57°	+3	L ou T	
48	»	—11,5	+16,7	+29,2	20,2	—4,9	+19,7	0,25	+55°,5	+2	T	
34 00	»	—39	+16,7	—29,2	42,4	—30,6	+29,4	1,04	—34°,5	—2	T	
35 36	28	—60	—33	+37	68,4	—67,8	+9,7	7,0	+28°,5	+3	L	
48	»	+60	+53,5	—66,5	80,4	+75,9	+29,3	2,6	—40°	—1	L	
56	»	—31,5	—51	+57	59,9	—47,4	—36,6	1,3	+43°,5	+3	L ou T	PSSS
36 04	»	+110	+127,4	0	168	+147,9	+80,6	1,83	0°	1	L	SR_2
25	»	—145	—38,2	+18,5	150	—149,2	+15,4	9,7	+7°	+3	L	PPSS'
34	»	+164	+18	—7,4	165	+159,7	—41,0	3,9	—2°,5	—1	L	
37 08	»	—110	—71	+18,5	131	—128	—80,6	1,59	+8°	+3	L ou T	
20	»	+142	+86,5	+11,1	166	+163,5	+30,9	53	+4°	+1	L	
30	»	—129	—46	+14,8	137	—136,9	+2,4	5,7	+6°	+3	L	
47	»	+124	—5,1	—33,3	124	+98,1	—48,5	2,04	—15°,5	—4	L	

TREMBLEMENT DE TERRE DU 16 JUIN 1929

Nouvelle-Zélande, 41°,9 S, 172°,5 E ; H. O : 22^h 47^m 09^s.

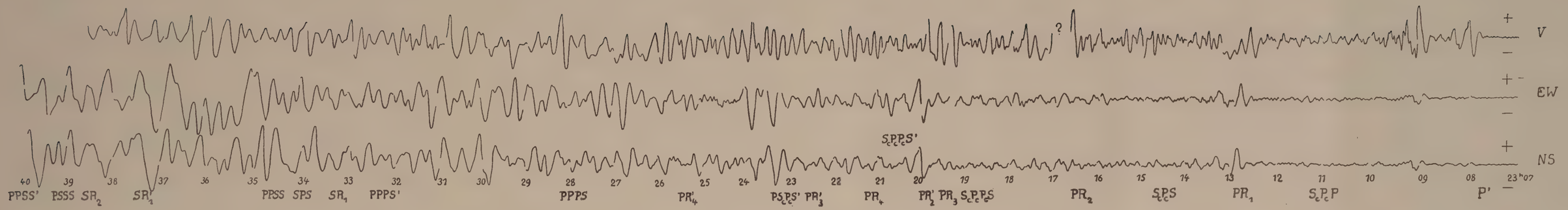
Inscriptions des appareils Galitzine de la station séismologique de De Bilt, dont les constantes sont les suivantes :

	T_1 s.	l_1 mm.	A_1 mm.	T s.	μ	K	$\log C_1$
Composante NS	24,43	123,13	1380	24,51	+0,03	11,01	$\bar{2}$,4058
— EW	25,30	122,58	1380	24,96	—0,01	11,19	$\bar{2}$,3669
— V	12,0	405,9	1380	12,0	0,0	177	$\bar{3}$,7177

$\Delta = 18440$ km. $\alpha = 42°20'$.

Heure h. m. s.	Tp s	EW A mesuré mm.	EW A calculé μ	NS A mesuré mm.	NS A calculé μ	$\Delta\tau$ s	Vertical Tp s	Vertical A mesuré mm.	Vertical A calculé μ	L	T	R total	$\frac{L}{T}$	Composante horizontale	e	Trièdre	α Angles de R avec ox	β Angles de R avec oy	γ Angles de R avec oz	Résultats
23 07 59	13	+1	+3,0	+1,0	+3,2	3,0	13	—12,5	—23,8	+4,38	+0,07	24,2	63	4,4	—80°	—1	83°	82°,5	10°	L
08 06	»	—0,4	—1,2	—1,2	—3,2	»	»	+12	+22,8	—4,17	—1,27	23,0	2,5	3,4	+81°,5	+3	87°	82°	8°	L
58	»	+3,0	+9,0	+2,0	+6,4	»	»	—10	—19	+10,8	—1,2	22,0	9	11,0	—60°	—1	66°	73°	30°,5	L
09 04	»	—4,5	—14,0	—4	—12,8	»	»	+20	+38	—18,9	+1,73	42,5	11	18,9	+64°,5	+3	71°	73°	26°,5	L
12	»	+2,0	+6,0	+2,5	+8,0	»	»	—10	—19	+9,95	+0,95	21,4	10,5	10	—62°,5	—1	73°,5	68°	27°,5	L
10 41	11	—1	—3,2	0	0	2,3	11	+2,0	+3,2	—2,15	+2,36	4,5	0,9	3,2	+35°	+1	45°	90°	45°	L?
48	»	+1,0	+3,2	+1,0	+3,3	»	»	—2,0	—3,2	+4,59	—0,15	5,6	30	4,6	—82°	—1	34°,5	36°	34°,5	L
52	»	—1,0	—3,2	—0,5	—1,6	»	»	+4,5	+7,2	—3,33	+1,29	8,0	2,5	3,6	+63°,5	+3	66°	78°,5	25°,5	L
11 15	10	+1,2	+4,0	+1,0	+3,4	2,1	14	—1,0	—1,5	+5,2	—0,66	5,5	8,0	5,2	—71°	—1	47°	38°	16°	L
21	»	—2,0	—6,7	0	0	»	»	+2,0	+3,0	—4,51	+4,95	7,3	0,9	6,7	+24°	+3	22°	90°	68°	L?
34,5	»	+2,2	+7,4	+0,5	+1,7	»	»	—3,0	—4,5	+6,23	—4,33	8,8	1,4	7,6	—31°	—1	32°,5	79°	59°	L
12 31	»	—1,5	—5,0	—0,5	—1,7	»	»	+7,0	+10,4	—4,61	+2,55	11,7	1,8	5,2	+63°	+3	65°	81°,5	28°	L
37	14	+2,0	+6,1	+0,5	+1,5	3,1	12	—9	—18,8	+5,22	—3,50	19,8	1,5	6,3	—71°,5	—1	72°,5	41°	18°	L
44,5	»	—5,0	—15,4	—3,0	—9,5	»	»	—5,0	—10,4	—17,4	+4,98	20,8	3,5	18,1	—30°	—3	42°	63°	61°	L
51,7	»	+10,5	+32,2	+11	+35	»	»	—6,5	—13,5	+47,55	—0,23	49,4	207	47,5	—16°	—1	48°,5	43°,5	74°	L
13 00	»	—5,0	—15,4	—7	—22	»	»	—7	—14,6	—26,63	—3,42	30,5	7,8	26,8	—28°	—3	61°	48°,5	63°	L
10	13	—5,0	—15,5	—4,0	—12,8	3,0	13	—2,0	—3,8	—19,89	+2,84	20,4	7,0	20,2	—10°,5	—3	40°,5	51°	79°	L
20	»	+6,0	+18,6	+5,0	+16,0	»	»	—6	—14,4	+24,36	—3,00	28,4	8,1	24,5	—30°,5	—1	49°	55°,5	59°,5	L
27,5	»	—2,0	—6,2	—1,2	—3,8	»	»	0	0	—6,98	+2,02	7,2	3,5	7,2	0°	—3	31°,5	58°,5	90°	L
53	14	+1,5	+4,6	—2,5	—7,8	3,1	14	—17	—35,4	—2,67	—8,65	36,5	0,31	9,0	—76°	—4	83°	70°,5	14°	T } ScPcS
14 22	»	—2,0	—6,1	+0,5	+1,6	»	»	—3,5	—7,3	—2,92	+5,58	9,6	0,52	6,3	—50°	—2	48°	80°,5	40°,5	T }
28	»	+1,8	+5,5	?	?	»	»	+3,5	+7,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
36	»	0	0	+9,0	+6,1	»	»	+4,0	+8,3	+4,51	+4,10	10,3	1,1	6,1	+53°,5	+?	90°	54°	36°	L ou T
40	»	+1,0	+3,0	+3,0	+9,2	»	»	—3,0	—6,2	+8,82	+3,98	11,5	2,2	9,6	—33°	—1	75°	36°,5	57°,5	L
44,5	»	—2,2	—6,7	—1,0	—3,1	»	»	+5,0	+10,4	—6,80	+2,87	12,7	2,37	7,3	+55°,5	+3	58°	75°,5	35°	L
56	»	+1,2	+3,7	—1,0	—3,1	»	»	+1,0	+2,1	+0,20	—4,81	52	0,04	4,8	+23°	+4	45°,5	53°,5	66°	T
15 50,7	10	—4,0	—13,4	—2,2	—7,6	2,1	10	—2,5	—3,7	—14,63	+4,78	15,8	3,0	15,4	—13°,5	—3	32°	61°	76°,5	L
58	»	+4,0	+13,4	+2,0	+6,9	»	»	+10,0	+14,9	+14,12	—5,26	21,2	2,7	15,0	+45°	+1	50°,5	71°	49°,5	L
16 08,6	»	+3,0	+10,0	—1,0	—3,4	»	»	—3,0	—4,5	+4,21	—9,68	11,5	0,43	10,5	—23°,5	—4	29°,5	73°	67°	T
17	»	—3,0	—10,0	—1,0	—3,4	»	»	+4,0	+6,0	—9,25	+5,10	12,1	1,8	10,5	+30°	+3	34°,5	74°	60°,5	L
40,4	17	—2,0	—6,2	—4,0	—13,0	4,0	»	+19	+53	—13,78	—4,17	55	2,7	14,4	+75°	+3	83°,5	76°,5	74°,5	L
48	»	+4,5	+14	+3,0	+9,7	»	»	—13	—36	+16,60	—3,81	39,8	4,35	16,7	—65°	—1	69°	76°,5	25°	L
58,5	»	—5,0	—15,6	—3,0	—9,7	»	»	+6	+16,8	—17,60	+5,08	24,8	3,4	18,3	+43°	+3	51°	51°	47°	L
17 03	13	+1,2	+3,7	—4,0	—12,8	3,0	14	+12	+22,8	—6,97	—11,35	33,2	0,61	13,3	+60°	+4	83°,5	67°,5	47°	T
51,7	14	+5,0	+15,4	+3,0	+9,5	3,1	»	+13	+27	+17,39	—5,00	32,5	3,08	18,1	+56°,5	+1	62°	73°	33°,5	L
18 01,8	»	—4,0	—12,3	+1,5	+4,7	»	»	—5,0	—10,4	—4,56	+12,25	16,8	0,39	13,1	—38°,5	—2	43°	74°	51°,5	T
08,2	»	+3,0	+9,2	—1,5	—4,7	»	»	+7	+14,6	+2,72	—9,96	17,8	0,27	10,3	+55°,5	+4	59°	75°	34°,5	T
18,5	»	—4,0	—12,3	+2,0	+6,3	»	»	—4	—8,3	—3,62	+13,3	16,1	0,27	13,8	—32°	—2	40°	67°	59°	T } ScPcPcS?
24,5	12	+2,0	+6,4	—2,5	—8,3	2,6	12	—3	—5,3	—1,82	—10,32	11,7	0,17	10,4	—27°,5	—4	57°	45°	63°	T
35	»	—3,5	—11,4	+1,0	+3,3	»	»	+8	+14,2	—5,23	+10,64	18,5	0,49	10,8	+52°,5	+2	52°	81°	40°	T
43	»	+3,5	+11,4	+0,5	+1,6	»	»	—6	—10,7	+8,86	—7,35	15,7	1,2	11,5	—43°	—1	43°,5	84°	47°	L
20 04	18	+14,5	+4,6	+11,5	+38	4,2	18	+1,7	+5,2	+5,91	—8,8	79,1	6,7	59,6	+41°	+1	54°,5	61°,5	49°	L
16	»	—7,0	—22,3	—6,0	—19,7	»	»	—3,0	—9,2	—29,58	+3,23	31,1	9,1	29,7	—17°,5	—3	44°	50°,5	73°	L
24	»	+5,0	+15,9	+4	+13,4	»	»	—2,0	—6,1	+20,61	—2,51	21,7	8,2	20,8	—16°	—1	47°	52°	73°,5	L
34	»	+2,0	+6,3	0	0	»	»	+7,0	+21,4	+4,24	—4,65	22,3	0,91	6,3	+74°	+	73°,5	90°	17°	T?
40	17	—10	—31	—2	—6,5	4,0	17	—4,0	—11,2	—25,67	+18,55	33,6	1,4	31,7	—19°,5	—3	84°	79°	70°,5	L
47	»	+6	+18,7	—2	—6,5	»	»	+4,0	+11,2	+7,80	—18,20	22,7	0,43	19,8	+29°,5	+4	34°,5	73°,5	60°,5	T
51	»	—5	—15,6	—2	—6,5	»	»	—2,0	—5,6	—15,30	+6,15	17,8	2,5	16,9	—18°,5	—3	29°	68°,5	72°	L
59	»	+7,5	+2,3	+5,0	+16,2	»	»	+2,0	+5,6	+13,53	+9,2	17,3	1,5	16,4	+19°	+1	82°,5	21°	71°	L
21 07,2	14	—5,5	—16,9	—4,5	—14,2	3,1	14	+5	+10,4	—21,88	+2,94	24,4	7,5	22,0	+25°,5	+3	46°,5	54°,5	65°	L
29	»	+5,0	+15,3	+4,0	+12,6	»	»	—6,0	—12,5	+19,57	—2,83	23,4	6,9	19,8	—32°,5	—1	49°	57°,5	58°	L
33	»	—3	—9,2	0	0	»	»	+3,0	+6,2	+6,20	—6,80	11,1	0,91	9,2	+34°	+	34°	90°	56°	T?
53	12	+4,5	+14,4	+1,0	+3,3	2,6	12	—9	—16	+12,13	—8,42	21,8	1,4	14,7	—47°,5	—1	47°	81°	43°	L ou T
22 00	»	—3	—9,6	+4,0	+13,2	»	»	+5	+8,9	+3,30	+15,99	18,6	0,20	16,3	+28°,5	+2	59°	45°	61°,5	T ScPcPcS'
07,2	»	+2	+6,4	—4,0	—13,2	»	»	—10	—17,8	—5,45	—13,62	23,1	0,40	14,6	—50°,5	—4	74°	55°	55°	T
12,5	»	—4,5	—15,0	+1,0	+3,3	»	»	+4,0	+7,1	—7,66	+13,30	16,9	0,57	15,3	+25°	+2	28°	79°	65°	T
18,5	»	+8	+27	+4,0	+13,2	»	»	—3,0	—5,3	+11,58	+6,90	14,5	1,7	13,4	—21°,5	—1	79°	25°	68°,5	L
24,6	»	—4,5	—15,2	—2,0	—6,6	»	»	+5,5	+9,8	—15,11	+6,74	19,2	2,2	16,5	+30°,5	+3	37°,5	70°	59°,5	L
31	»	+3,0	+10	—0,5	—1,6	»	»	—6	—10,7	+5,55	—8,46	14,7	0,65	10,1	—47°	—4	47°	84°	43°,5	T
37	»	—5	—16,9	—4,5	—14,9	»	»	+1,5	+2,6	—22,39	+2,42	22,7	9,2	22,5	+6°	+3	42°	49°	83°	L
43	»	+2,0	+6,7	+3,0	+10,0	»	»	—1,0	—1,8	+11,90	+1,78	12,2	6,7	12,0	—7°	—1	56°,5	35°	81°,5	L
53,5	»	+3,0	+10,0	+2,0	+6,6	»	»	+11	+19,6	+11,60	—2,95	23,0	3,9	12,0	+58°,5	+1	64°,5	73°,5	31°,5	L
23 00	18	—5	—16	—5,0	—16,5	4,2	18	—7	—21,4	—22,97	+0,71	31,5	32	23,0	—43°	—3	59°,5	58°,5	47°	L

	08,3	»	+7	+22,3	+9	+29,7	»	»	−12	−36,7	+26,96	+3,50	52,2	7,7	37,0	−45°	−1	65°	68°	45°,5	L					
	17	15	−17	−52,3	−15	−47,5	3,4	15	+9,5	+21,6	−70,25	+6,67	73,9	10,8	70,6	+20°	+3	45°	50°	73°	L					
	29	»	+9,5	+29,1	+12	+38	»	»	+10	+22,8	+47,70	+4,08	53,0	11,7	47,8	+25°,5	+1	56°,5	44°	64°,5	L					
	36	»	+8	+24,6	0	0	»	»	−9	−20,5	+16,56	+18,20	32,0	0,91	24,6	−40°	−?	40°	90°	50°	T?					
	47,5	»	−20	−61,5	−10	−31,6	»	»	+3	+6,8	−64,78	+24,18	69,4	2,7	69,2	+5°,5	+3	27°,5	63°	79°	L					
	58	»	+9	+27,6	+2,5	+7,9	»	»	−3	−6,8	+24,43	−15,08	29,5	1,6	28,7	−13°,5	−1	20°,5	74°,5	76°,5	L					
24	53	11	+4,0	+12,9	+4,0	+13,2	2,3	11	−7	−11,2	+18,44	−0,63	21,6	29	18,4	−31°	−1	53°,5	52°,5	59°	L					
25	05	»	−6,5	−21,0	−8,5	−28	»	»	+6	+9,6	−34,84	−3,33	36,3	10,4	35	+15°,5	+3	54°,5	39°,5	74°,5	L					
	11	»	+4	+12,9	+7	+25	»	»	−6	−9,6	+27,16	+7,30	29,7	3,7	28,2	−19°	−1	64°	32°,5	71°	L					
	16,5	»	−7	−22,5	−1,0	−3,3	»	»	+3,0	+4,8	−17,46	+14,27	23,2	1,2	22,7	+12°	+3	84°	82°	78°	L ou T					
	22,5	»	+4,0	+13	−1,5	−5,0	»	»	−9	−14,4	+5,06	−12,97	20,0	0,39	13,9	−46°	−4	49°,5	75°,5	44°	T	PS$_c$P$_c$S′				
	32	20	−2	−6,8	+3,5	+12,2	4,6	20	+7	+26	+4,43	+13,23	29,5	0,33	14,0	+62°	+2	76°,5	65°,5	28°	T					
	37	»	+7	+23,4	+3,0	+10,4	»	»	−9	−33,6	+23,45	−10,14	34,3	2,3	25,6	−53°	−1	47°	72°,5	12°	L					
	50,5	»	−9	−30	−8	−28	»	»	+8	+29,8	−40,90	+3,33	50,7	12,3	41	+39°,5	+3	27°	56°,5	54°	L					
26	02	16	+2	+6,3	+3	+9,5	3,8	16	+14	+35	+11,26	+1,74	37,3	6,5	11,4	+72°	+1	80°,5	69°	19°,5	L					
	11,5	»	−4,5	−13,9	−3,5	−11,2	»	»	+7	+17,6	−17,64	+2,73	25,0	6,5	17,8	+45°	+3	75°,5	63°,5	45°	L					
	18,9	»	+7	+21,6	+5,5	+17,4	»	»	−12	−30	+27,40	−4,25	40,8	6,5	27,7	−47°	−1	70°	65°	43°	L					
	28	»	−3	−9,2	−2	−6,3	»	»	−19	−22,5	−10,85	+2,56	25,1	4,1	11,1	−65°	−3	68°,5	75°,5	26°,5	L					
	35,4	»	+12	+37	+10	+31,7	»	»	0	0	+48,35	−8,00	48,7	6,04	48,7	0°	1	40°,5	49°,5	90°	L					
	44	18	−20	−63	−9,5	−31,4	4,2	18	−12	−36,7	−65,64	+25,42	79,3	2,6	70,3	−27°	−3	37°	67°	62°,5	L					
	55	»	+12	+38	+7,5	+24,7	»	»	−9	−27,5	+43,86	−11,47	53,0	3,8	45,3	−31°	−1	46°	62°	58°,5	L					
27	03	»	−7	−22,2	−2,5	−8,25	»	»	−13	−40	−21,05	+10,86	46,5	1,9	23,7	−62°	−3	60°,5	80°	30°,5	L					
	11,5	»	+10,5	+31,6	+3,5	+11,5	»	»	−6	−18,3	+29,78	−15,62	38,3	1,9	33,6	−28°	−1	34°,5	72°,5	61°,5	L					
	21	»	−11	−35	−6	−19,7	»	»	+3,5	+10,7	−38,13	+12,61	41,6	3,0	40,2	+15°	+3	32°,5	62°	75°	L					
	28	»	+5,5	+17,5	+4	+13,4	»	»	−3,0	−9,2	+21,68	−3,91	23,9	5,5	22,0	−22°,5	−1	65°	55°,5	67°,5	L					
	43	»	−5	−15,9	−6	−19,7	»	»	−8	−24,4	−25,26	−1,52	35,0	16,8	25,3	−44°	−3	63°	55°,5	46°	L					
	49,5	»	+5	+15,9	−2	−6,6	»	»	−11	−33,6	+5,82	−16,19	37,7	0,36	17,2	−63°	−4	65°	81°,5	27°	T					
28	21	20	+9	+30	+6	+20,5	4,6	20	−18	−67,2	+35,36	−8,38	76,4	4,2	36,3	−61°,5	−1	67°	74°,5	28°	L					
	29,4	»	−8	−26,7	−8	−27,8	»	»	+18	+67,2	−38,53	+1,02	77,5	38	38,5	+60°	+3	69°	69°	27°	L					
	33,5	»	0	0	−5	−17,4	»	»	−7	−26	−12,86	−11,07	31,3	1,3	17,4	−56°,5	−?	90°	56°,5	34°	L					
	41	24	−11,5	−44	−6,5	−26	5,3	24	+3,0	+16,3	−48,85	+15,02	53,6	3,2	51,1	+17°	+3	37°	61°	72°,5	L					
	54,5	»	+10	+38,1	+8	+32,1	»	»	−5	−27,2	+49,39	−6,55	56,8	7,5	49,8	−28°,5	−1	19°	55°,5	61°,5	L					
29	04,2	18	−14	−44,5	0	0	4,2	18	−6	−18,6	−29,97	+32,90	48,2	0,91	44,5	−24°,5	−?	23°	90°	67°,5	T?	PPPS?				
	11,5	»	+19	+60,5	+2,5	+8,2	»	»	+5	+15,3	+46,80	−39,20	63,0	1,2	61,0	+14°	+1	16°	82°,5	76°	L ou T					
	22	»	−12	−38,2	−3,5	−11,5	»	»	−2,0	−6,1	−34,22	+20,50	40,3	1,7	24,3	−14°	−3	19°	73°,5	81°	L ou T					
	33,5	»	+18,5	+59	+0,5	+1,6	»	»	−13	−46	+40,92	−42,55	74,8	0,96	59,0	−38°	−1	38°	77°,5	52°	T					
	53	»	−15	−48	−15	−49,5	»	»	−4	−12,2	−68,93	+2,15	70,0	32	68,9	−10°	−3	47°	45°	80°	L					
30	04,2	19	+13,5	+44	+18	+61	4,4	19	−5	−16,8	+74,73	+8,55	77,0	8,7	75,2	−12°,5	−1	55°	37°,5	77°,5	L					
	12,5	»	−5	−16,3	0	0	»	»	+5	+16,8	−10,98	+12,05	23,4	0,91	16,3	+46°	+?	46°,5	90°	44°	T?					
	27,4	»	+6	+19,5	−7	−23,8	»	»	−9	−33,5	−4,47	−30,45	45,4	0,14	30,7	−47°,5	−4	64°,5	64°,5	42°,5	T					
	44	23	−12	−44	−5	−19,3	5,1	23	−11	−55	−44,04	+14,41	73,0	3,0	48,0	−49°	−3	53°	53°	41°	L					
	55	»	+15	+55	+15	+58	»	»	+17	+84,5	+79,87	−3,36	112	24	79,6	+47°	+1	60°,5	59°	37°,5	L					
31	06,3	19	−20	−65	−14	−47,5	4,4	19	−3,0	−10,1	−78	+16,26	81,1	4,8	80,5	−7°	−3	36°,5	54°,5	83°	L					
	14,5	»	+6	+19,5	+6,5	+22	»	»	−5,0	−16,8	+29,39	+0,39	33,8	75	29,4	−30°	−1	55°	49°,5	60°	L					
	25	»	+11	+35,8	+6	+20,4	»	»	−3,0	−10,1	+39,19	−12,72	42,4	3,1	41,2	−13°,5	−1	32°,5	61°,5	76°	L					
	35	»	−8	−26	−9	−30,5	»	»	+11,0	+37	−40,06	−1,22	54,5	33	40,1	+42°,5	+3	61°,5	56°	47°	L					
	49	»	+6	+19,5	+4	+13,6	»	»	−7,0	−23,6	+23,18	−5,25	33,5	4,45	23,7	−44°,5	−1	54°,5	66°	45°	L					
32	04	14	+3,5	+10,7	−6	−19	3,1	14	+8	+16,6	−6,85	−20,71	27,4	0,25	21,8	+37°,5	+4	67°	27°	52°,5	T	PPSS′				
	11	»	−7	−21,5	+3	+9,5	»	»	−10	−20,8	−7,46	+22,30	31,4	0,33	23,5	−41°,5	−2	47°	72°,5	48°,5	T					
	18	»	+5,5	+16,9	+2	+6,3	»	»	+5	+10,4	+16,04	−8,26	20,8	1,9	18,0	+30°	+1	35°,5	72°,5	60°	L					
	25	»	−3,5	−10,7	−2	−6,3	»	»	−4	−8,3	−11,85	+3,67	14,9	3,2	12,4	−34°	−3	44°	65°	56°	L					
	33	»	+10,5	+32,2	+8	+25,3	»	»	+5	+10,4	+40,39	−6,76	42,2	6,0	41,0	+14°	+1	40°	53°	76°	L					
	42	»	−6	−18,4	−3	−9,5	»	»	−4	−8,3	−19,42	+7,21	22,3	2,7	20,7	−20°	−3	34°,5	65°	68°	L					
	59	»	+3,5	+10,7	0	0	»	»	+7,5	+15,6	+7,20	−7,91	18,9	0,91	10,7	+56°,5	+?	55°,5	90°	34°,5	T?					
33	06,8	16	+5,0	+16,5	+4	+12,7	3,8	16	+10	+25	+20,50	−3,65	32,5	5,6	20,8	+50°	+1	36°,5	67°	39°,5	L					
	14,5	»	−8	−26	−8	−25,4	»	»	−2	−5,0	−36,29	+2,12	36,7	17	36,3	−8°	−3	44°,5	46°	82°	L					
	25	»	+7	+22,8	+3	+9,5	»	»	+2	+5,0	+22,37	−10,46	25,2	2,1	24,7	+12°,5	+1	25°	68°	78°,5	L					
	31	»	−2,2	−6,8	−5	−15,8	»	»	−8	−20	−16,26	−5,62	26,4	2,9	17,2	−49°	−3	75°	53°	41°	L	SR$_1$				
	39	»	+7	+22,8	−3	−9,5	»	»	+5	+12,6	+8,33	−23,26	27,7	0,35	24,7	+27°	+4	34°,5	70°	63°	T					
	48,5	»	−10	−31	+20	+6,3	»	»	−2,0	−5,0	−16,22	+22,45	32,0	0,72	31,6	−9°	−2	14°	79°	81°	T					
	59	»	+13	+40	+6	+19	»	»	−18	−45	+40,98	−16,77	63,1	2,4	44,2	−46°	−1	50°,5	72°,5	44°,5	L					
34	05,8	21	−4	−14,0	−7	−25,0	4,8	21	+9	+37	−27,91	−6,49	46,8	4,3	28,7	+52°	+3	73°	58°	37°,5	L	SP$_c$S				
	09,7	»	+3,5	+12,6	−11	−39,5	»	»	+5	+20,5	−20,72	−35,91	46,2	0,58	41,5	+63°,5	+4	74°	31°	63°,5	T					
	15,5	»	−11,5	−39,6	−5	−18,0	»	»	+2,0	+8,2	−40,12	+15,69	44,2	2,5	43,5	+10°,5	+3	26°,5	66°	79°,5	L					
	21,7	»	+2,5	+8,6	−5	−18,0	»	»	−12	−49,2	−7,52	−18,47	53,1	0,40	19,9	−68°	−4	79°	70°,5	22°,5	T	PPSS				
	27	»	−7	−24,6	+6	+21,6	»	»	+6	+24,6	−0,60	+32,73	42,1	0,02	32,7	+40°,5	+2	54°,5	59°	54°,5	T					
	35	»	+13	+44,7	+19	+68,3	»	»	−3	−12,3	+80,60	+12,96	82,5	6,2	81,6	−8°,5	−1	57°	33°,5	81°,5	L					
	43,5	»	−16,5	−56,8	−17	−61	»	»	−4	−16,4	−83,35	+0,91	85,0	92	83,3	−11°	−3	48°	44°	79°	L					
	53	»	+16	+55	+15	+54	»	»	−2	−8,2	+76,96	−4,30	77,5	18	77,0	−6°	−1	44°,5	46°	84°	L					
	58	»	+12,5	+43	−5	−18	»	»	+5	+20,5	+15,64	−43,92	50,9	0,36	46,6	+24°	+4	32°	69°,5	66°	T					
35	02,8	16	+18	+55,7	−5	−15,8	3,8	16	−2	−5	+25,83	−51,82	58,1	0,50	57,9	−5°	−4	17°	74°	85°	T	?				
	18,5	»	−20	−62	+9	+28,6	»	»	+4	+10	−20,61	+65,09	69,0	0,32	68,2	+8°	+2	25°,5	65°,5	81°,5	T					
	26	»	−7	−22,8	+9	+28,6	»	»	+8	+20	+5,79	+36,11	41,7	0,16	36,6	+29°	+2	79°,5	47°	61°	T					
	34	»	−23	−70	−6	−19	»	»	−13	−32,6	−61,18	+38,94	79,5	1,6	72,5	−24°	−3	28°	76°	65°,5	L					
	41,5	»	−3,5	−11,4	−4	−12,7	»	»	+10	+25	−17,06	−0,13	30,3	131	17,0	+56°	+3	68°	65°,5	34°,5	T					
	50	»	−26	−80,5	−2	−6,3	»	»	+9	+21,5	−59,01	+55,14	83,5	1,1	80,7	+17°	+3	15°	41°	75°	L ou T					
	57	»	−1,5	−4,6	−2	−6,3	»	»	−15	−37,6	−7,74	−0,84	38,4	9,2	7,8	−78°	−3	83°	80°,5	11°	L					
36	05,2	37	−2,6	−17,6	0	0	6,5	37	0	0	−5,11	+5,62	7,6	0,92	7,6	?	?	0°	90°	90°	T?					
	13,5	»	−4	−27,0	+14	+102	»	»	+12	+186	+57,21	+88,66	214	0,65	106	+60°,5	+2	83°	61°,5	29°,5	T					
	22	»	−23	−155	−7	−51	»	»	−17	−264	−142,1	+80,3	310	1,8	163	−58°,5	−3	60°	80°,5	32°	L					
	47	»	+21,5	+146	−5	−36,4	»	»	−5	−77,5	+71,4	−132,51	168	0,54	150	−27°,5	−4	30°	77°,5	62°,5	T					
37	04	45	−25	−245	−10	−107	5,3	45	−4	−104	−244,1	+109,1	287	2,2	267	−21°,5	−3	31°,5	65°	69°	L					
	26	»	+16	+157	+15	+160	»	»	−2	−52	+222,7	−6,8	230	3,3	224	−13°	−1	47°	46°	77°	L					
	48,5	»	−10	−98	+7	+75	»	»	−4	−104	−10,56	+122,96	162	0,08	123	−40°	−2	53°	62°,5	50°	T	SR′$_1$				
38	08	33	+17	+96	−14	−84	6,4	33	+1,0	+11,6	+2,55	−127,54	128	0,02	127	+5°,5	+4	49°	49°	84°	T					
	20,5	»	−11	−62	0	0	»	»	+2,0	+23,2	−41,75	+45,83	66	0,91	62	+20°,5	+?	19°,5	90°	69°,5	T?					
	33,5	»	+7	+39,4	+7	+42	»	»	−2,0	−23,2	+57,58	−0,85	62,1	68	57,5	−22°	−1	50°,5	51°	68°	L					
	41	»	−12	−67,5	−7	−42	»	»	0	0	−76,51	+21,60	79,5	3,5	79,5	0°	3	31°,5	58°,5	90°	L					
	58	»	+18,5	+104	+8	+48	»	»	−5,0	−21,4	+105,54	−44,56	114	2,4	114	−11°	−1	24°,5	65°,5	79°,5	L					
39	21,5	»	−16	−90	+7	+42	»	»	−5,0	−21,4	−29,56	+94,82	101	0,31	99,3	−12°	−2	27°	65°,5	77°,5	T	PSSS				
	30,5	28	+10	+44,9	−23	−110	5,7	28	+5	+38,5	−51,07	−107,28	125	0,47	119	+18°	+4	69°	28°	72°	T	SR$_2$				
	49	»	−5	−22,4	+10	+47,6	»	»	−8	−62	+20,11	+48,62	81,3	0,41	52,6	−50°	−2	74°	54°	40°,5	T	PPSS′				
	57	»	+18	+81	+9	+43	»	»	+7	+54	+86,35	−30,92	106	2,8	91,7	+31°	+1	40°	66°	59°	L					
40	19,5	45	−21	−206	−15	−160	5,3	45	+1	+26,1	−257,0	+44,6	262	5,75	260	+6°	+3	42°,5	52°,5	84°	L					
	41	»	+36	+353	+8	+85,5	»	»	+8	+208	+300,9	−203,4	419	1,4	363	+3°	+1	32°,5	78°	60°,5	L					
41	06	»	−42	−412	+8?	+85,5?	»	»	−10	−261	−214,2	+362,1	495	0,59	420	−32°	−2	33°,5	80°	58°	T					



Tremblement de terre du 16 juin 1929 (Nouvelle-Zélande). — Séismogrammes (De Bilt) relatifs au tableau détaillé.

I

ONDES P ET S ET LEURS DÉRIVÉES

Ondes P, P′ et Pp

1. *Azimut* $< 90^{o}$.

Il n'est pas toujours possible d'effectuer des mesures pour les trois ondes. En effet, dans les séismes éloignés, la valeur de la composante verticale est toujours très grande. Au contraire celles des composantes horizontales sont faibles et souvent mal définies. Cela provient de ce que le rayon séismique est sensiblement perpendiculaire au plan horizontal et que, dans le cas d'une onde longitudinale, seul le vecteur-amplitude dirigé dans le sens de la propagation peut avoir de l'importance.

Pour la distance épicentrale de 11530 km. P et P′ ont été trouvés si faibles qu'aucune mesure n'a pu être faite. Pour 12990 km. P, dont la période est de 6^{s}, a été étudié ainsi que P′ :

L	0,87	0,90	1,17	0,83	0,78	0,58	0,88
T	0,20	0,13	0,16	0,33	0,08	0,23	0,35

alors que la composante verticale est très petite. Le vecteur R fait un angle de 75^{o} à 80^{o} avec la verticale. Quand $\Delta = 16760$ km.*[1], P n'est plus visible. Pour P′ :

L	+12,43	—21,1	+12,75	—13,4
T	+0,13	—0,7	+1,9	+0,21
e	—66°	+69°	—76°	+69°,5.

Quand Δ croît, l'énergie de P′ diminue. Pour le même tremblement, inscrit par les stations d'Uccle et de De Bilt, on

1. Les tremblements de terre marqués d'un astérisque * sont ceux pour lesquels des tableaux détaillés ont été publiés.

observe que P′ est peu visible sur les composantes horizontales, par contre la composante verticale est très grande.

Quand $\Delta = 18440$ km.*, deux mesures ont pu être faites pour P' :

L	+4,38	—3,17
T	+0,07	—1,27
e	—80°	+81°,5

Par contre l'onde de Berlage (1) pP est très belle :

L	—18,9	+10,0
T	+1,7	+0,95
e	+64°,5	—62°,5,

et sa période est la même ($T_p = 13$ s) que celle de P, mais e est plus petit.

Quand $\Delta = 18660$ km., on trouve pour pP les valeurs suivantes :

L	—1,7	+6,6	1,1	+6,1
T	—0,09	+0,12	3,9	+3,0
e	0°	+32°	+4°	+37°

et $T_p = 17^s$.

2. *Azimut* = *200°* ; Δ = *12400 km.**

Examinons ce qui se passe dans un autre azimut pour une distance de 12400 km. P est très net sur la composante NS, plus faible sur EW, pendant que les élongations verticales sont très grandes. P est suivi à environ 30^s d'intervalle d'une autre onde longitudinale, probablement pP, ayant la même période.

Pour P :

L	—3,64	+8,9	—3,64	—4,2	—6,2	+6,2
T	+0,38	+0,13	+0,38	+1,5	+0,72	—0,72
e	—60°	+41°	—69°	—35°	0°	+65°

L	—6,2	+6,7	—6,2
T	+0,72	+0,76	—0,55
e	—70°	+68°	—74°

le vecteur-amplitude étant toujours contenu dans les qua-

drants —3 et +1[1] ; les angles qu'il fait avec le plan horizontal, à part trois valeurs très faibles, sont de l'ordre de 70°. Il semble même que cet angle augmente à mesure que l'on s'éloigne de l'impétus initial. P′ est très faible, à peine marqué sur la composante verticale, invisible sur les horizontales. Les résultats des mesures sont mauvais :

L	—2,5	+0,55	—3,31	+3,2	+3,3	—3,1
T	—2,5	+1,52	—0,26	+0,54	+0,26	+0,93
e	—49°	+51°	—66°	+52°	+43°	—58°

En conclusion on peut dire que, si les amplitudes atteintes par la vibration dans le cas de P, P′ et pP sur les trois composantes sont assez grandes pour permettre des mesures, il est toujours possible de prouver qu'il s'agit bien d'une onde longitudinale, c'est-à-dire que le vecteur-amplitude est toujours dirigé dans le sens du rayon séismique.

Ondes PR_1, PR_2, PR_3

1. *Azimut* < 90°

De même que pour les ondes qui les précèdent, il est parfois impossible d'étudier PR_1, PR_2 et PR_3. Les premières mesures ont été faites pour une distance épicentrale de 12990 km.

PR_1 : 26 mesures en tout ; pour 25 d'entre elles, L est supérieur à T, le rapport $\frac{L}{T}$ atteignant 86. La 26e est douteuse, car l'amplitude sur l'EW est nulle, et dans la suite je n'ai plus tenu compte de mesures de ce genre.

Pour PR_2 cinq mesures ont été faites :

L	—3,57	+6,2	—11,1	+6,0	—8,7
T	—1,7	+0,8	+2,5	+0,8	—2,9

1. J'ai adopté la convention suivante pour les trièdres : ONZE : + 1, ONZW : +2, OZWS : +3, OSEZ : +4 ; OENZ′ : —1, ONWZ′ : —2, OWSZ′ : —3, OSZ′E : —4.

PR_3 se confond avec S_cP_cS.

Pour 16760 km.*, PR_1 et S_cP_cP ont sensiblement les mêmes temps de propagation. Pour PR_1 :

L	—13,1	+25,1	—15,9	+13,5	—4,41	+14,8	—10,3
T	—2,3	—1,2	+2,9	—3,1	+7,85	+0,59	+4,85
e	+68°,5	—67°	+66°,5	—74°	+69°,5	—59°	—65°

La 5e mesure indiquerait qu'une onde transversale apparaît à ce moment ; pour toutes les autres mesures, au contraire, $\frac{L}{T} > 1$ et e est grand.

PR_2 arrive deux secondes après S_cP_cS : or pour cette région les valeurs de L et T, ainsi que celles de e, montrent que l'on a affaire à une vibration longitudinale. Aucune mesure de la minute correspondante ne semble indiquer la présence d'une onde transversale. Il est possible que, PR_2 ayant plus d'énergie que S_cP_cS pour ces distances, cette dernière onde soit étouffée. On a les résultats suivants :

L	—16,4	+26,6	—18,5	+15,1	—10,8
T	0	—3,8	+2,8	—3,6	+7,1
e	+57°	—60°,5	+61°	—41°	—17°

On voit de suite que e est plus petit que pour PR_1.

PR_3 :

L	+16,4	—8,97	+16,35	—13,8	+15,8	—20,2
T	—3,1	+5,4	—3,7	+0,45	—1,1	—3,6
e	—36°	+59°	—68°	+59°	+31°	+39°,5

Pour $\Delta = 18440$ km.*, PR_1 est très important ; 6 mesures ont été faites :

L	—4,61	+5,22	—17,4	+47,55	—26,6	—19,9
T	+2,55	—3,5	+5,0	—0,23	—3,4	+2,8
e	+63°	—71°,5	—30°	—16°	—28°	—10°,5

L'angle e est très faible pour certaines mesures, tandis que pour les deux premières il a une valeur plus grande ; il est possible qu'il s'agisse de deux vibrations distinctes, peut-être S_cP_cP et PR_1.

Pour PR_2, 6 mesures ont été faites, donnant des valeurs supérieures à 1 pour $\frac{L}{T}$, pour deux autres $\frac{L}{T} < 1$:

L	—14,63	+14,2	+4,21	—9,25	—13,78	+16,6
T	+4,8	—5,3	—9,7	+5,1	—4,2	—3,8
e	—13°,5	+45°	—23°,5	+30°	+75°	—65°

L	—17,6	—7,0
T	+5,1	—11,35
e	+43°	+60°

On trouve encore la même variation de e que pour PR_1. Les deux points où $\frac{L}{T}$ est inférieur à 1 ne peuvent être reliés à aucune onde connue ; PR_3 arrive en même temps que $S_cP_cP_cS$. Les mesures sont peu précises car l'inscription de la minute correspondante est coupée par le bord de la feuille pour les composantes horizontales, et le passage des heures de mesure d'une composante à l'autre ne peut se faire d'une manière précise.

Pour $\Delta = 18410$ km., PR_1 est faible et irrégulier sur les horizontaux et aucune mesure n'a pu être faite. Les élongations sont au contraire très grandes sur la composante verticale.

PR_2 est encore très faible sur les inscriptions des composantes horizontales. Les résultats sont mauvais, car c'est une onde très perturbée :

L	—4,5	+6,8	—9,7	—5,5	+7,8
T	—4,6	+6,9	—10,8	+3,3	—1,1
e	+73°	—71°	+49°	+18°	—74°

PR_3 est particulièrement net sur V et sur NS. Cette onde arrive en même temps que PR'_2. L'inscription fournie par la composante EW est assez embrouillée :

L	—13,0	+8,0	—18,7	+9,1	+5,8	—20,9	+18,7
T	—3,8	—3,3	—0,4	—4,5	—1,1	+1,9	+0,4
e	—58°	—68°	+36°	—67°,5	+57°,5	+8°	—18°

L	+15,4	—30,6	+9,5	—19,2	+34,4	—31,4
T	—6,1	+3,0	+4,8	—14,4	+13,5	+2,9
e	+29°	—45°	+49°	—52°	+54°,5	—54°

e est très variable ; tout se passe comme si le vecteur tournait autour de la direction de propagation.

Lorsque $\Delta = 18660$ km., 4 mesures ont été effectuées pour PR_1 :

L	—12,8	+27,7	—12,1	+18,6
T	—1,8	—9,4	—9,5	+4,4
e	—44°	—25°	—21°	+24°

C'est une onde bien caractérisée sur les trois composantes, de période égale à 15^s, mais les angles que fait le vecteur résultant avec le plan horizontal sont exceptionnellement faibles.

PR_2 aussi est nettement inscrit, quoiqu'un peu faiblement :

L	+10,3	—7,1	+3,3	—12,6	+16,8	—5,7
T	+3,1	—1,6	+6,0	—2,8	—3,8	—4,4
e	+9°	+23°	—26°	+7°	+48°	+12°

Ainsi que pour PR_1, e est petit pour PR_2.

Peut-être la troisième valeur, $\frac{L}{T} = 0{,}5$, provient-elle d'un résidu de S_cP_cS. Il est cependant tout aussi probable qu'elle est due à une mauvaise mesure, car les élongations qui entrent en ligne de compte sont très faibles.

PR_3 arrive théoriquement au milieu d'un grand nombre d'ondes transversales. Cette vibration semble cependant avoir le plus d'énergie, car aucune mesure effectuée pour la région correspondante n'indique nettement la présence d'une onde transversale.

2. *Azimut* = 200° ; Δ = *12400 km.*

Pour PR_1, les composantes horizontales et verticale sont très grandes, particulièrement sur NS et V ; cependant les impétus sont peu nets sur les inscriptions des composantes horizontales :

L	+4,63	—25,0	+20,5	+22,0	—21,2	+32,4	—19,5
T	—1,60	—3,38	—0,65	—0,10	+2,0	—4,58	—7,19
e	+70°	—47°	+69°	—30°	+55°	+57°	—68°,5

L	+16,6	—22,6	+31,56	—23,44	+19,37	—20,44
T	+1,22	—1,73	—1,53	—2,04	+3,83	—0,93
e	—31°	+18°,5	+59°	—62°	+66°,5	—68°

Les valeurs de $\frac{L}{T}$ sont très grandes, la composante T étant très petite, et la direction de vibration est bien celle des ondes longitudinales.

L'onde PR_2 est très bien inscrite sur les composantes horizontales, moins bien par V, car elle est perturbée par les dernières vibrations de PR_1 :

L	+21,35	—19,2	+8,8	—9,9	+10,2	—20,9	+17,5
T	—8,22	+7,21	—3,89	—10,4	+0,44	+0,61	—0,28
e	+32°	—33°	+64°	—53°	+62°	—45°	+45°

L	+17,5	—12,3	+10,7
T	—0,28	—3,9	—1,1
e	+57°	—67°,5	+52°

Ici encore, les valeurs de T sont la plupart du temps négligeables par comparaison avec celles de L, le rapport $\frac{L}{T}$ atteignant 63. Une seule fois on remarque un $\frac{L}{T} < 1$, ne correspondant d'ailleurs à aucune onde transversale.

PR_3 est encore net sur les séismogrammes relatifs aux composantes horizontales :

L	+17,15	—22,2	+18,4	—15,9	—14,3	+14,8	—19,0
T	—0,28	+4,9	—12,9	+10,7	—6,9	+5,5	+1,2
e	+51°,5	—33°	+61°	—53°	—33°	—21°,5	+44°,5

On a encore affaire à une onde longitudinale.

PR_4 arrive presque en même temps que S_cP_cS. On peut donc s'attendre à ce que cette onde transversale soit peu visible.

En effet

L	+11,03	+3,98	+10,0	—8,92	+2,14	—14,15
T	—2,44	—3,07	+0,37	—3,28	—5,81	+1,39
e	—70°	+78°	—62°	+38°	—54°	+28°

Une mesure seulement (la 6e) où $\frac{L}{T} < 1$ semble prouver la présence d'une onde transversale.

Les ondes PR_1, PR_2, PR_3 ont été trouvées pour toutes les dis-

tances et tous les azimuts. Les résultats ont été les plus nets pour les distances inférieures à 17000 km. où, en général, la valeur du résidu transversal n'était que de $\frac{1}{10}$ *de celle du vecteur dans le sens de la propagation. Les angles* e *ont presque toujours été grands. Chaque fois qu'une de ces ondes arrive en même temps qu'une onde transversale, cette dernière est à peu près masquée par la vibration longitudinale ; il faudrait par conséquent admettre que celle-ci possède une énergie plus grande.*

Ondes transversales

L'étude des ondes transversales est particulièrement importante, car elle nous permet de tirer des conclusions sur la constitution du noyau de la terre.

Rappel des principales théories au sujet de la constitution du noyau.

L'étude des séismes très éloignés montre qu'à l'intérieur du globe se trouve un noyau dans lequel les ondes longitudinales ont une vitesse beaucoup plus faible que dans les couches de l'écorce. Si l'on désigne par V la vitesse des ondes longitudinales, V′ celle des ondes transversales, et si λ et μ sont les coefficients d'élasticité de Lamé, ρ la densité, on a les relations suivantes :

$$V^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \qquad V'^2 = \frac{\mu}{\rho}$$

Pour les liquides : $\mu = 0$ et $V^2 = \frac{\lambda}{\rho}$.

La diminution de V dans le noyau peut avoir deux causes :

1° la densité peut croître brusquement ;

2° le noyau peut se comporter comme un liquide.

Dans le premier cas λ et μ peuvent également varier, comme λ et ρ dans le second. En outre, le passage de l'écorce au noyau peut se faire d'une manière continue.

On a émis un grand nombre d'hypothèses au sujet de l'état

physique du noyau de la terre. Tous les auteurs sont d'accord en ce qui concerne l'augmentation de la densité avec la profondeur, mais s'appuient chacun sur des raisons différentes.

On sait que Perrey avait supposé que l'intérieur du globe était fluide (théorie des marées internes) (21, 23) ; cette hypothèse a perdu de sa valeur depuis les progrès de la thermodynamique. Quoique certains auteurs l'admettent encore maintenant (7), Lord Kelvin (11) fait remarquer que, si la présence des volcans et le degré géothermique prouvent que la température est très élevée au voisinage de l'écorce, il n'est pas certain que cette température augmente jusqu'au centre de la terre en suivant toujours la même loi. Si d'autre part la température est très élevée, la pression croît énormément. D'après Rudzki, celle-ci pourrait atteindre 1.700.000 atmosphères au centre de la terre (25). Or si l'on applique les formules de Clapeyron-Thomson, conséquences des principes de l'énergie et de l'entropie, on est conduit à supposer que le point de fusion de la plupart des corps est élevé par la compression. Rien ne s'oppose donc à ce que nous admettions que cette compression est telle que le point de fusion des différents corps n'est pas atteint au centre de la terre et que celui-ci est à l'état solide ou dans un état correspondant à l'état solide au point de vue de la rigidité. De plus, Lord Kelvin (11) a montré que la terre ne pourrait résister aux forces dues aux marées internes que si elle était plus rigide que l'acier, ce qui n'est pas le cas. D'ailleurs s'il en était ainsi, on ne pourrait pas observer les marées ordinaires de la mer.

Tammann (28) a montré que la température de fusion ne croît pas indéfiniment lorsque la pression augmente. Elle croît d'abord, passe par un maximum, puis, si la pression augmente encore, elle diminue de nouveau. Ainsi à une certaine profondeur, qui correspond à la pression du maximum, le magma peut se solidifier. Cette solidification s'étend rapidement vers l'extérieur où la pression est moindre, et où elle est accompagnée de contraction. Vers l'intérieur elle est plus

lente et accompagnée de dilatation ; ceci amènerait à supposer l'existence de deux feuillets concentriques soumis à des pressions différentes. Günther (5) suppose un noyau central gazeux monoatomique. Il admet l'existence de sept couches : la croûte terrestre, une zone de plasticité latente, le magma silicaté, une couche liquide, une zone gazeuse, une zone de gaz ayant dépassé l'état critique, et enfin le noyau central monoatomique où toute individualité des différents gaz aurait disparu, le passage de l'une des couches à l'autre se faisant d'une manière continue.

D'autres auteurs, en particulier E. Wiechert (8), supposent que par suite de la densité moyenne très élevée de la terre celle-ci est composée de deux parties : une écorce rocheuse et un noyau formé essentiellement de métaux, les densités moyennes de chacune des deux parties restant sensiblement constantes. En s'appuyant sur la valeur de ε — aplatissement du globe — et sur le fait que la densité de la croûte rocheuse ne peut dépasser 3,4, il arrive à la conclusion que le rayon du noyau métallique doit atteindre 0,75 ou 0,80 du rayon du globe et que sa densité moyenne doit être un peu supérieure à 8, c'est-à-dire égale à celle du fer légèrement comprimé.

Cette hypothèse a été reprise par Klussmann (12), qui s'appuie sur les observations séismologiques. Il suppose, comme E. Wiechert, que la densité ne varie pas d'une manière continue. Or dans ce cas des surfaces de discontinuité doivent exister, sur lesquelles des réflexions et des réfractions d'ondes séismiques peuvent avoir lieu. C'est bien ce que les études de Geiger et de Gutenberg (4) ont montré. Ces auteurs ont admis des surfaces de discontinuité à des profondeurs de 1193, 1712 (très peu marquée) et 2454 km. Klussmann ne tient pas compte de la deuxième ; il admet une terre composée de trois parties et arrive à une composition du noyau analogue à celle donnée par E. Wiechert. E. Marsh (19) suppose également trois parties : une couche de granite de 510 km., une deuxième de basalte de 1153 km. et un noyau métallique de 4707 km. d'épaisseur. D'après lui les matériaux

du centre de la terre sont séparés en couches par suite de la gravitation, et ainsi le centre du noyau, dont il estime la densité égale à 25,0, serait essentiellement constitué de métaux lourds.

Il est inutile de rappeler ici toutes les autres théories, celles-ci étant résumées dans les ouvrages de Gutenberg (7), de Rudzki (25) et de Klussmann (12).

Les séismologues actuels se sont avant tout appliqués à rechercher si l'on pouvait trouver des ondes transversales directes qui ont traversé le noyau de la terre, s'appuyant d'ailleurs uniquement sur les temps de propagation et non sur les directions de vibration des ondes. Admettant pour le noyau un coefficient de Poisson égal à celui de l'écorce, Gutenberg (8) avait calculé des temps de propagation théoriques pour les ondes S'_1 et S'_2 correspondant à P'_1 et P'_2. Beaucoup de recherches furent faites à ce sujet, mais des difficultés se présentent, d'une part parce que le nombre de séismogrammes utilisables est très faible, d'autre part parce que beaucoup d'autres phases (PS, PPS, SP_cP_cS, $S_cP_cP_cP_cS$, etc.) arrivent sensiblement en même temps. La meilleure preuve de l'existence des S' serait l'observation de leur foyer. Macelwane (17) essaya de le trouver, mais échoua ; la détermination en est d'ailleurs très difficile, car ce point se trouverait à peu près au croisement des hodochrones de PPS et PR'_3 et aussi très près de $S_cP_cP_cS$, de sorte que les grandes amplitudes sur les séismogrammes à cet endroit peuvent provenir d'une superposition de ces différentes ondes et ne prouvent pas du tout la présence du foyer. Malgré cela, Macelwane admet l'existence de S'_1 et S'_2, dont les temps de propagande sont peu différents des valeurs théoriques déterminées par Gutenberg.

Ces ondes ont été également trouvées par Krumbach (13) et Imamura (9). Gutenberg, cependant, conteste la validité de ces résultats en faisant remarquer que chaque point obtenu peut être attribué à d'autres ondes, différentes de S'. Il conclut dans son mémoire que jusqu'à présent les observa-

tions ne sont pas suffisantes pour établir la présence de S', mais qu'il serait prématuré d'exclure définitivement la possibilité de l'existence d'une onde S' faible.

Les quelques résultats que j'ai obtenus par la méthode de « recomposition » semblent confirmer ceux de Macelwane et indiquer qu'il faudrait compter avec la présence des ondes transversales directes même pour des distances épicentrales de 17000 km. et davantage.

1. *Azimut* $< 90^o$.

Pour $\Delta = 10050$ km., l'onde transversale directe est nettement inscrite. Elle arrive à peu près 30^s après S_cP_cS et 6^s après S_cP_cP S. Pour la région correspondant à S, on relève les résultats suivants :

L	+0,5	—3,8	+0,4	—0,8	+3,0	—1,3
T	—9,7	—3,7	—12,3	+11,8	+11,7	+15,9
$\frac{L}{T}$	0,05	1,02	0,03	0,06	0,35	0,08
e	—8°	+15°	—12°	+31°	+13°	+5°

C'est donc bien une vibration transversale[1].

Quand Δ croît jusqu'à 11530 km., le temps de propagation donné par les tables de Macelwane conduit à une région du séismogramme où huit des mesures indiquent la présence d'une onde transversale. En effet :

L	—1,9	—1,3	—2,0	—4,2	+2,9	+0,9	—1,2
T	—12,6	+16,0	+4,5	+4,5	—7,9	—3,3	+1,1
$\frac{L}{T}$	0,14	0,08	0,44	0,93	0,37	0,27	1,1
e	—16°,5	+5°,5	+16°	+13°	+26°	+55°	—72°

L	—0,4	—0,4
T	—6,8	+1,8
$\frac{L}{T}$	0,06	0,22
e	+43°	—70°,5

1. Dans le cas des ondes transversales, je reproduis également la valeur $\frac{L}{T}$ à côté des valeurs absolues de L et de T.

Malgré certaines valeurs de $\frac{L}{T}$ voisines de 1, venant de ce que les ondes transversales restent toujours mélangées aux résidus des ondes longitudinales, on voit bien que là encore il s'agit d'une vibration transversale. L'angle e, qui gardait une certaine constance dans le cas des ondes longitudinales, est soumis à de grandes variations.

On observe les mêmes faits pour la distance épicentrale de 12990 km. Le temps de propagation de S est de $27^m\,43^s$. Pour la partie correspondante du séismogramme, on relève les mesures suivantes :

L	+3,5	—2,4	+1,6	—3,4	+1,2	—5,6
T	—3,7	+9,0	—7,1	+8,2	—9,5	+2,2
$\frac{L}{T}$	0,95	0,27	0,23	0,41	0,13	2,5,

la composante verticale étant très faible.

En extrapolant grossièrement et en continuant l'hodochrone des S que donne Macelwane (fig. 5) par une ligne droite, on est conduit à un temps de propagation des S′ de $31^m\,52^s$ à 32^m pour une distance épicentrale de 16760 km.*. Ce temps de propagation ne diffère que de quelques secondes de celui de PR_4. Or les mesures effectuées pour ce train d'ondes conduisent à deux valeurs $\frac{L}{T}$ plus petites que 1 :

L	—20,2	+3,75	—0,64	—0,8
T	—3,6	+2,32	—3,97	+7,5
$\frac{L}{T}$	5,6	1,62	0,16	0,11
e	+39°,5	—6°,5	—22°	0°

Pour un troisième point $\frac{L}{T}$ est aussi inférieur à 1, mais comme la valeur de la composante verticale n'a pas pu être relevée, je n'en ai pas tenu compte.

Aucune autre onde transversale ne pouvant apparaître à ce moment, il est bien probable que là encore il s'agit de l'onde transversale directe.

Par une extrapolation analogue, on obtient un temps de

propagation de $34^m\ 00^s$ pour $\Delta = 18440$ km.*. A l'endroit correspondant du séismogramme, on trouve les valeurs :

L	+4,24	—25,67	+7,8	—15,3	+13,5
T	—4,65	+18,55	—18,2	+6,15	+9,2
$\frac{L}{T}$	0,91	1,4	0,43	2,5	1,5
e	+74°	—19°,5	+29°,5	—18°,5	+19°

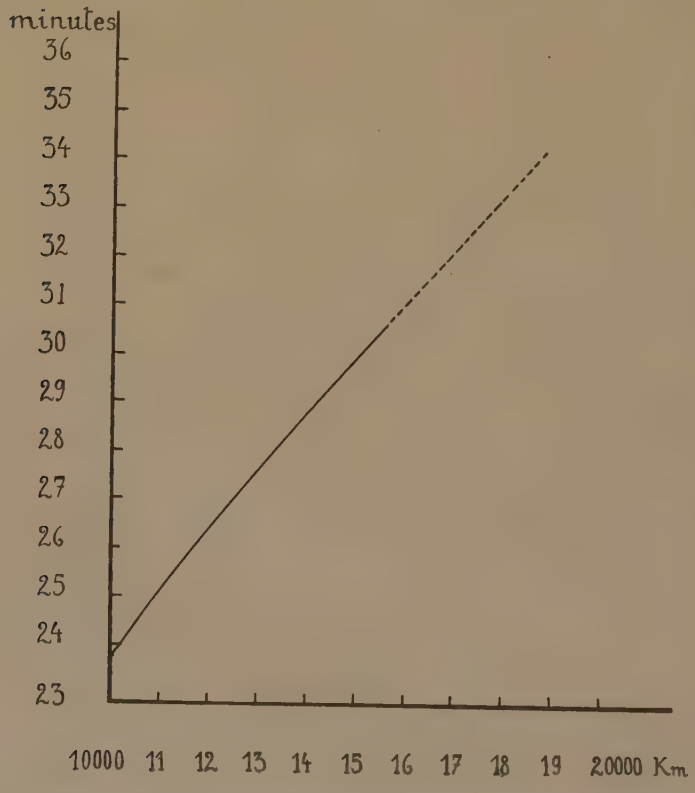


Fig. 5. — Courbe hodochrone de S (d'après Macelwane) (en trait plein) continuée par une ligne droite en pointillé.

Pour deux mesures $\frac{L}{T}$ est plus petit que 1, les autres rapports restant au voisinage de 1 ; tout porte à croire qu'on a encore affaire à une onde transversale. Mais dans ce cas le résultat

est moins sûr, car $S_cP_cP_cS'$ doit arriver presque au même instant et il est difficile de séparer ces deux ondes.

Pour $\Delta = 18410$ km., le temps de propagation serait de $33^m\ 40^s$ à $33^m\ 50^s$. Si sur les séismogrammes on se reporte à une trentaine de secondes avant l'époque en question, on note les valeurs suivantes :

L	+13,2	+0,5	+2,8
T	+8,4	—17,5	+11,7
$\frac{L}{T}$	1,6	0,03	0,24
e	+63°	—67°	—52°

ne correspondant à aucune onde transversale connue, à moins que S_cP_cS arrive une minute plus tôt que ne l'indique sa courbe hodochrone théorique telle qu'elle est donnée par Macelwane.

Pour $\Delta = 18660$ km., le temps de propagation approximatif serait de 34^m à $34^m\ 10^s$, mais les résultats obtenus sont douteux et d'ailleurs $S_cP_cP_cS'$ arrive en même temps.

2. *Azimut* = *200°* ; Δ = *12400 km.**.

On remarque pour la minute correspondant à l'heure d'arrivée théorique des S une onde très importante, surtout sur la composante EW. Si on l'étudie, on obtient les valeurs suivantes :

L	—9,19	+18,35	—19,68	+1,93	—4,33	—4,44
T	—11,57	+5,16	+12,35	—4,01	—34,53	—46,95
$\frac{L}{T}$	0,8	3,5	1,6	0,48	0,12	0,09
e	—35°	0°	0°	+60°	+27°	+16°

L	—20,09	+14,45
T	—9,11	+0,10
$\frac{L}{T}$	2,2	144
e	+9°	—67°

Là encore on a une bonne concordance entre les temps de propagation théorique et la direction de vibration de l'onde transversale correspondante.

En résumé, il y a lieu de distinguer deux cas :

1° *pour les distances de l'ordre de 12000 km., où S' doit encore apparaître sur les inscriptions, on trouve à l'endroit correspondant une onde telle que la projection du vecteur-amplitude sur un plan perpendiculaire à la direction de propagation est nettement plus grande que la projection sur la direction de propagation, et qui est par conséquent une onde transversale ;*

2° *pour les distances plus grandes, un certain nombre de mesures indiquent qu'une onde transversale directe (?) apparaît encore à 16760 km. et peut-être même au delà de cette distance.*

Onde PS

Théoriquement il faut s'attendre à ce que, suivant les distances épicentrales, on ait un mélange d'ondes longitudinales et transversales correspondant à PS et SP, ayant sensiblement les mêmes temps de propagation. On ne peut donc pas espérer avoir des résultats nets pour ce train d'ondes.

1. *Azimut* $< 90°$.

Pour $\Delta = 10050$ km., PS est très net, les amplitudes correspondantes étant grandes :

L	+1,7	+4,8	+0,5	+0,9
T	—8,5	—5,6	+0,2	—1,5
$\frac{L}{T}$	0,20	0,85	2,5	0,60
e	—26°	—35°	—80°	+40°

Quand $\Delta = 11530$ km., PS ne peut pas être distingué. Lorsque $\Delta = 12990$ km., le rapport $\frac{L}{T}$ est très petit, mais une fois seulement $\frac{L}{T}$ est plus petit que 1 ; il semble bien que là on soit en présence d'un mélange d'ondes longitudinales et transversales. Pour 16760 km.* les temps de propagation de PS ne sont plus donnés, et d'ailleurs on n'en trouve pas non plus de traces sur les séismogrammes, pas plus que pour les distances épicentrales de 18440 et 18660 km. Quand

$\Delta = 18410$ km., on remarque bien l'apparition d'une onde transversale environ deux minutes après les S' hypothétiques, mais il est plus probable qu'elle appartient au train d'ondes PS_cP_cS.

2. *Azimut* = *200°* ; Δ = *12400 km.**

Dans le cas du tremblement de terre des îles Sandwich, les mesures aux environs de l'heure d'apparition théorique des PS donnent :

L	—18,55	+21,57	—4,32	+41,17	—1,32	+41,17	—140
T	+3,18	—7,08	+11,73	—18,29	+12,83	—18,29	+18,35
$\frac{L}{T}$	5,8	3,0	0,37	2,2	0,10	2,2	7,6
e	—36°	+43°	—50°	+6°	—44°	—51°	—27°

Pour deux mesures seulement $\frac{L}{T} < 1$; il semble que là aussi on ait un mélange de SP et de PS.

Dans toutes ces mesures je n'ai jamais eu de résultats nets, excepté pour la distance de 10050 km. Pour toutes les distances supérieures, ainsi que pour les autres azimuts, les traces d'ondes transversales ont été très faibles. Il faut en conclure que, ou bien l'énergie des ondes PS est très faible, ou bien on ne constate pas seulement l'arrivée de PS, mais aussi celle de SP.

Ondes PPS, PSS, PPP, etc...

Dans le cas de séismes éloignés, on remarque fréquemment les ondes complexes réfléchies deux ou trois fois à la surface du globe, telles que PPS, PSS, PPPS, PPSS et PSSS. L'étude de ces ondes est particulièrement compliquée pour les petites distances car, leurs temps de propagation étant peu différents, on n'arrive pas à les séparer les unes des autres.

1. *Azimut* < *90°*.

Pour $\Delta = 10050$ km., PPS et PPPS et S se suivent de

très près. Les mesures effectuées pour les deux minutes correspondantes permettent de conclure qu'il s'agit bien de plusieurs trains d'ondes transversales, mais on ne peut pas bien reconnaître à quelle onde appartient une élongation donnée. Pour $\Delta = 12100$ km., les temps d'apparition paraissent conformes à la théorie et on a :

L	—9,6	—0,3	—28,9	+ 3,0	+4,5	+19,9	+2,1
T	+2,5	—4,7	+1,0	—8,2	+5,0	+1,1	—2,3
$\frac{L}{T}$	3,8	0,06	28,9	0,36	0,9	18,0	0,9
e	+56°	—44°	+11°,5	—33°	+12°,5	+8°	—68°

Cependant les grands maximums de ce train d'ondes très net correspondent à une vibration longitudinale. Pour $\Delta = 12990$ km., PSS n'a pas pu être distingué et PPSS arrive trop près de SR_1 pour qu'on puisse l'en différencier. Il en est à peu près de même lorsque $\Delta = 16760$ km.* : PPS, PPPS sont très peu visibles ; de plus, ils arrivent dans une région du sismogramme extrêmement perturbée en même temps que PS_cP_cS' et PR'_3. Les mesures relevées donnent :

L	+12,6	—16,9	+25,4	—10,4	+7,4	—14,7	+23,6
T	—8,4	+19,7	—3,5	+1,6	—6,4	+9,2	—14,9
$\frac{L}{T}$	1,5	0,86	7,2	6,5	1,16	1,6	1,6
e	—53°,5	+36°	—27°	—66°	+49°	+42°	—10°

L	—15,5	+30,4	—22,3	+10,5	—1,8
T	+10,7	+3,1	+2,4	+2,0	+7,9
$\frac{L}{T}$	1,45	9,8	9,3	5,2	0,23
e	—58°	+27°,5	+42°,5	—59°	+30°,5

L'inclinaison e du vecteur est très variable. On est certainement en présence d'un mélange d'ondes longitudinales et transversales, les rapports $\frac{L}{T}$ mesurés étant pour la plupart voisins de 1. SPS et PPSS arrivent à peu près en même temps que SR_1 et aucune étude de ces ondes n'est possible, SR_1 en étant la plus importante. De même SR_2 et PSSS ont les mêmes temps de propagation. Pour $\Delta = 18410$ km., PPS est

très faiblement marqué ; les valeurs des rapports $\frac{L}{T}$ relatifs à cette région sont plus grands que 1. Sur 11 mesures, une seule ($\frac{L}{T} = 0{,}36$) pourrait prouver la présence d'une onde transversale.

Pour $\Delta = 18440$ km.*, PPPS est aussi très faible ; on distingue sur le séismogramme un nouvel impétus, mais l'onde qui lui correspond est longitudinale à une seule exception près. Sur les séismogrammes, on peut également noter les impétus correspondant à PPPS' (réfléchi sur la face opposée du globe, $\Delta > 180°$). On a :

L	—6,85	—7,46	+16,04	—11,85
T	—20,71	+22,30	—8,26	+3,67
$\frac{L}{T}$	0,25	0,33	1,9	3,2
e	+37°,5	—41°,5	+30°	—34°

pour la région en question ; le temps de propagation qu'on peut déduire de cette observation diffère de 40 secondes de celui donné par Macelwane.

Pour la partie du séismogramme correspondant à l'heure d'arrivée de PPSS, on a les mesures suivantes (s'étendant sur 3 minutes) :

L	—27,91	—20,72	—40,12	—7,52	—0,60	+80,60	—83,35
T	—6,49	—35,91	+15,69	—18,47	+32,73	+12,96	+0,91
$\frac{L}{T}$	4,3	0,58	2,5	0,40	0,02	6,2	92
e	+52°	+63°,5	+10°,5	—68°	+40°,5	—8°,5	—11°

L	+76,96	+15,64	+25,83	—20,61	+5,79	—61,18
T	—4,30	—43,92	—51,82	+65,09	+36,11	+38,94
$\frac{L}{T}$	18	0,36	0,50	0,32	0,10	1,6
e	6°	+24°	5°	+8°	+29°	24°

L	—17,06	—59,01	—7,74	—5,11	+57,21	—142,1	+71,40
T	—0,13	+55,14	—0,84	+5,62	+88,66	+80,3	—132,51
$\frac{L}{T}$	131	1,1	9,2	0,92	0,65	1,8	0,54
e	56°	17°	78°	0°	+60°,5	—58°,5	—27°,5

Deux interprétations sont possibles : ou bien le premier

groupe de $\frac{L}{T} < 1$ correspond à PPPS et dans ce cas son temps de propagation serait trop long d'environ 30 secondes et la deuxième onde transversale ne correspondrait à aucune vibration connue, ou bien le second groupe correspond à PPSS, alors le premier serait SP S et il faudrait augmenter les temps de propagation respectifs de 30 à 40 secondes. C'est la deuxième interprétation qui paraît être la plus acceptable, mais dans les deux cas aucune onde connue ne correspond au troisième groupe de vibrations transversales. PSSS et PPSS′ arrivent en même temps que SR_2.

Pour une distance épicentrale de 18660 km., PPPS est visible sur les séismogrammes. Deux mesures prouvent qu'il s'agit bien d'une onde transversale de longue période ($T = 23^s$) :

L	—8,5	+1,6	+3,2	+20,7	+9,5
T	+24,9	—15,3	+1,7	—8,6	+10,2
$\frac{L}{T}$	0,3	0,1	1,9	2,4	0,9
e	—3°	—6°	+23°	—8°	—6°

Le vecteur se trouve presque dans le plan horizontal.

2. *Azimut = 200° ; Δ = 12400 km.**

PPS et PPPS arrivent presque en même temps que P P_cP_cP et P SS_cP, deux ondes longitudinales :

L	—49,88	+75,12	—10,81	+28,67	—57,13	+1,51
T	+24,92	—21,36	—6,68	—38,77	—11,23	+5,15
$\frac{L}{T}$	17,0	35	1,6	0,73	5,1	0,29
e	—46°	—51°	+36°	—53°	+47°	—62°

En deux points seulement on trouve des traces d'ondes transversales, ce qui montre que celles-ci sont très faibles pour cette distance, PPSS arrive à la même heure que SR_2.

Pour les ondes réfléchies complexes les résultats sont peu nets. Elles sont en général couvertes par d'autres phases. De plus les temps de propagation, dans le cas où elles apparaissent

nettement sur les séismogrammes, ne sont pas toujours en accord avec ceux donnés par les tables de Macelwane.

Ondes SR_1, SR_2, SR_3

Les deux premières de ces ondes ont toujours été trouvées sur les séismogrammes et leur existence a pu être prouvée par l'étude des directions de vibration.

1. *Azimut* $< 90°$.

Lorsque $\Delta = 10050$ km., SR_1 précède de quelques secondes seulement la phase SPS qui est bientôt suivie de PPSS. Pendant les deux minutes correspondantes, les vibrations sont transversales. En trois points seulement, dus probablement à $P_cP_cP_cP$, on obtient deux valeurs de $\frac{L}{T}$ inférieures à 1.

L	—3,1	+4,6	—1,0	+5,3	—5,8	—1,7
T	+3,8	—9,1	+6,1	—2,8	+1,9	—55,0
$\frac{L}{T}$	0,81	0,50	0,16	1,88	3,05	0,03
e	—15°	+20°	—14°	+25°	+48°	—9°

L	—10,0	+24,7	—1,9	+8,6	—6,2	—4,3	—9,3
T	+5,2	+44,9	+26,2	+29,7	—25,6	—51,8	+22,9
$\frac{L}{T}$	1,92	0,55	0,07	0,29	0,24	0,08	0,40
e	+23°	+4°	+6°	+10°	—15°	0°	+8°

L	+14,7	—4,5
T	+33,8	+13,1
$\frac{L}{T}$	0,43	0,34
e	—3°	+3°

SR_2 est peu visible, cependant deux bonnes valeurs de $\frac{L}{T}$ y correspondent :

L	+0,6	+0,6
T	—5,2	—6,4
$\frac{L}{T}$	0,11	0,09
e	—9°	—15°

Au contraire SR_3 paraît avoir plus d'énergie, car pour cette région des séismogrammes on relève les observations suivantes :

L	+3,6	+2,2	—3,9	+2,7	—6,3	+0,2
T	—10,6	+19,2	—13,2	—11,6	+7,4	—4,5
$\frac{L}{T}$	0,34	0,11	0,30	0,23	0,85	0,04
e	—5°	—18°	+29°	+10°	—50°	+55°

Quand $\Delta = 11530$ km., SR_1 est assez faible :

L	+12,1	—10,1	—6,6
T	—10,5	+20,4	+2,3
$\frac{L}{T}$	1,1	0,5	2,9
e	—25°,5	+12°,5	+47°

Les rapports $\frac{L}{T}$ sont très petits, mais une fois seulement $\frac{L}{T}$ est plus petit que 1 et les grands maximums, au contraire, sont dus à une onde longitudinale plus intense. Par contre SR_2 paraît être bien inscrit, mais le temps de propagation observé est inférieur d'une minute à celui donné par les tables de Macelwane :

L	+1,5	—9,7	+3,1	—3,6	—23,6	—12,9
T	+6,0	+0,1	+12,1	+16,5	—16,5	—22,7
$\frac{L}{T}$	0,25	97	0,25	0,22	1,43	0,57
e	+13°,5	—13°	—19°,5	+19°,5	—9°	+1°,5

SR_3 est probablement très faible pour cette distance, car on n'en trouve pas de traces sur les séismogrammes ; il est possible qu'il soit étouffé par les ondes longitudinales.

Lorsque $\Delta = 12990$ km., on trouve des traces d'ondes transversales 15 secondes déjà avant l'heure d'arrivée calculée de SR_1 :

L	—5,6	—11,8	+8,6	+9,3
T	+7,5	—11,5	—9,7	+7,8
$\frac{L}{T}$	0,75	1,1	0,89	1,2

e étant grand.

SR_2 a la même période que SR_1 ($T = 16^s$). Pour cette région :

L	—9,4	—2,5	—21,6	+13,5	—1,6	+19,4	—18,2
T	—0,8	—26,8	+3,0	—9,1	+34,4	+9,2	+3,9
$\frac{L}{T}$	11,7	0,09	7,2	1,5	0,05	2,1	4,7

L	+20,6	—10,7	+2,4	—16,2
T	—2,1	+32,8	—14,7	+17,9
$\frac{L}{T}$	9,8	0,33	0,16	0,91

Les deux premières mesures sont probablement dues à SR_2, mais aucune onde transversale ne correspond aux autres.

SR_1 arrive 30 secondes avant SPS et une minute avant PPSS lorsque $\Delta = 16760$ km.*. Pour les deux minutes en question, les valeurs de L et de T sont les suivantes :

L	—21,54	+19,5	—13,2	+10,0	+17,4	—3,4	—7,3
T	+12,1	+9,1	—7,8	+15,2	—28,0	+20,0	—26,3
$\frac{L}{T}$	1,78	2,14	1,7	0,66	0,62	0,17	0,28
e	+28°,5	+21°,5	—51°	+52°,5	—42°	+35°	—36°

L	+34,2	—30,2
T	+9,6	—8,1
$\frac{L}{T}$	3,5	3,7
e	—15°	+30°

On s'aperçoit de suite qu'aucune différenciation ne peut être faite entre les trois ondes. Sans doute SR_1 est celle qui a le plus d'énergie, mais cette onde ne peut être décelée qu'environ 50 secondes après l'heure d'arrivée calculée. La valeur de e, qui décroît lentement, ne peut non plus donner de renseignements pour les points où $\frac{L}{T}$ est plus petit que 1.

SR_2 et PSSS se suivent à 7^s d'intervalle. Les résultats sont mauvais, ce qui est probablement dû au fait que les différentes lignes s'enchevêtrent sur la composante EW à cause de la trop grande élongation des amplitudes.

Pour $\Delta = 18410$ km., SR_1 est inscrit nettement :

L	+0,6	+6,9	—19,5	+30,5	—27,0
T	—18,2	+20,7	—5,2	—0,7	+27,6
$\frac{L}{T}$	0,03	0,33	3,8	48	0,98
e	—68°	+53°	+37°	+42°	—21°,5

SR_2 ne peut pas être étudié, car les élongations sont très grandes sur les composantes horizontales et les lignes sont enchevêtrées.

Lorsque $\Delta = 18440$ km.*, SR_1 et SPS se suivent de très près. Les mesures effectuées pour la minute en question donnent les résultats suivants :

L	+20,5	—36,29	+22,37	—16,26	+8,33	—16,22	+40,98
T	—3,65	+2,12	—10,46	—5,62	—23,26	+22,45	—16,77
$\frac{L}{T}$	5,6	17	2,1	2,9	0,35	0,72	2,4
e	+50°	—8°	+12°,5	—49°	+27°	—9°	—46°

Ces deux valeurs $\frac{L}{T} < 1$ sont probablement dues à SR_1 et non à SPS, car ainsi la concordance entre le temps de propagation théorique et l'heure de l'impétus de cette onde serait très bonne. SR_2 arrive presque en même temps que PSSS et PPSS' :

L	—29,56	—51,07	+20,11	+86,35	—257,0	+300,9	214,2
T	+94,82	—107,28	+48,62	—30,92	+44,6	—203,4	+362,1
$\frac{L}{T}$	0,31	0,47	0,41	2,8	5,75	1,4	0,59
e	—12°	+18°	—50°	+31°	+6°	+30°	—32°

Ces résultats montrent bien qu'il existe là une ou plusieurs ondes transversales importantes.

$\Delta = 18660$ km. : SR_1 et SPS se suivent de très près. Pour les deux minutes en question, on a :

L	—10,6	+16,0	—20,6	+0,5	—27,2	+36,3	+30,4
T	—25,6	+6,5	—11,4	+6,5	+7,5	—3,2	+4,7
$\frac{L}{T}$	0,4	2,5	1,8	0,07	3,6	11,3	6,5
e	+11°	+33°	—12°	—70°	—4°	+0°	—2°

L	—45,9	—4,5	—31,6
T	—15,5	+93,3	—51,1
$\frac{L}{T}$	3,0	0,04	0,4
e	+1°	+3°	—36°

Il est probable que les deux premières valeurs de $\frac{L}{T} < 1$ correspondent à SR_1 (période $T = 18^s$) et les suivantes à SPS

(période T = 30^{s}), car s'il n'en était pas ainsi il faudrait augmenter le temps de propagation de SR_1 de une minute pour cette distance.

2. *Azimut = 200°; Δ = 12400 km.**

Les séismogrammes relatifs à ce tremblement de terre présentent la particularité suivante : les maximums atteints par l'onde SR_1 sont exceptionnellement grands sur les composantes horizontales. On mesure des amplitudes de 400 microns sur l'EW, de 850 microns sur le NS, les déplacements du sol atteignant 942 microns — c'est-à-dire à peine moins d'un millimètre — à la station séismologique de De Bilt. On remarque d'ailleurs les mêmes amplitudes sur les inscriptions des composantes horizontales de Strasbourg. Il est difficile de faire intervenir un phénomène de résonance, car les périodes des séismographes fonctionnant dans les deux stations étaient différentes à ce moment : environ 11 secondes à Strasbourg et 24 secondes à De Bilt. Comme ce phénomène s'observe à la fois à Strasbourg et à De Bilt, il ne peut non plus être dû au sous-sol de la station, mais il représente bien une caractéristique du séisme. Pour les deux stations, les périodes de SR_1 ont été trouvées égales à 32 et à 34 secondes respectivement, c'est-à-dire une période particulièrement longue.

J'ai voulu rechercher si ce phénomène se répète pour les autres séismes de cette région. Ce contrôle n'est pas aisé, car les séismes pour lesquels les appareils de Strasbourg inscrivent clairement les principales phases sont très rares dans cette partie du globe. La plupart d'entre eux ne sont notés à Strasbourg que par des longues ondes. Je n'ai par suite pu consulter que les inscriptions des séismes des 1er mai 1923, 21 mars et 20 juin 1926, 18 août 1930 et 23 février 1932. Seul celui du 21 mars 1926 présente la même particularité, mais à une échelle moindre. Pour tous les autres, SR_1 est peu net et les amplitudes atteintes ne sont pas plus grandes que celles de S.

Il est curieux de noter que l'épicentre du séisme du 27 juin 1929, tel qu'il a été déterminé par Tams (29), a une longitude analogue à celle des épicentres fréquents de l'Islande pour lesquels S est très prononcé, et il serait intéressant de rechercher si, pour tous les tremblements provenant de l'Atlantique Nord ou Sud, on observe des particularités en ce qui concerne la formation et la propagation des ondes transversales.

Malgré les grandes amplitudes, les mesures faites ne conduisent pas à de très bons résultats.

L	+5,57	—22,07	+36,85	—30,22	—11,51
T	+2,88	+9,75	+33,94	—68,68	+139,6
$\frac{L}{T}$	1,9	2,3	1,1	0,44	0,08
e	—55°	—31°	+26°	—60°	—57°

En deux points seulement $\frac{L}{T}$ est plus petit que 1. Évidemment les valeurs 1,1 et 1,9 paraissent prouver la présence d'une onde transversale, mais il est néanmoins surprenant que des rapports $\frac{L}{T} > 1$ correspondent aux très grandes amplitudes du train d'ondes SR_1. On y obtient, en effet, les valeurs suivantes :

L	—685,4	+988,7	—553,9	+557,9	—189,6
T	—108,1	—80,3	+129,5	—102,4	+51,7
$\frac{L}{T}$	6,3	12,4	4,3	5,5	3,7
e	—3°	—2°	+18°	+24°	—3°

Les valeurs de e sont très petites. D'après le chemin parcouru par les ondes séismiques SR_1, l'angle d'émergence doit être assez grand (comparable à celui de PR_1, où l'on mesure 60°) ; par conséquent l'angle du vecteur-amplitude avec la direction du rayon séismique est grand, le plan de vibration de l'onde fait un angle important avec cette direction du rayon séismique ; on peut donc en déduire que la vibration est transversale.

Si l'on étudie la région du séismogramme correspondant à l'heure d'arrivée de SR_2, on ne trouve pas de trace d'ondes

transversales. Mais on peut déterminer deux ondes transversales arrivant, l'une une minute avant l'heure théorique, l'autre une minute après ce moment. Or PSSS doit arriver un peu avant SR_2. Il est probable que les premières mesures appartiennent à ce train d'ondes, mais on ne peut pas affirmer que la seconde est bien SR_2, car dans ce cas il faudrait introduire une correction de une minute environ pour sa courbe hodochrone. Une anomalie dans les temps de propagation n'est pas surprenante. J. Lacoste (15), dans son étude du tremblement de terre du 14 janvier 1931, a trouvé de grands écarts entre les différentes tables relatives aux durées de propagation des SR_1.

SR_1 et SR_2 ont toujours pu être mis en évidence, quoique ces ondes n'atteignent pas partout des amplitudes suffisantes pour permettre des mesures précises nombreuses.

II

ONDES AYANT TRAVERSÉ LE NOYAU DE LA TERRE

On ne peut pas espérer avoir des résultats aussi sûrs que pour les ondes du premier groupe, car elles n'ont presque jamais des impétus aussi nets.

Onde S_cP_cP

C'est une onde d'amplitude très faible en général, sauf pour le foyer qui, d'après Gutenberg et Richter (8), doit correspondre à une distance épicentrale voisine de 131° ; ces auteurs indiquent n'avoir observé cette onde qu'à des distances épicentrales comprises entre 127° et 145° au maximum, soit 14000 km. à 16000 km., excepté pour deux observations où $\Delta = 17800$ et 18300 km.

J'ai pu contrôler ces données : pour les distances de l'ordre de 12000 km. je n'ai pas trouvé de traces de cette onde, et ceci dans aucun azimut. Pour 16760 km.* au contraire, elle arrive en même temps que PR_4 et ne peut par conséquent pas être étudiée. Mais pour les distances épicentrales voisines de 18000 km., on la remarque nettement sur les séismogrammes, quoique avec des amplitudes faibles.

Pour $\Delta = 18410$ km., aucune mesure n'a pu être effectuée, car l'agitation microséismique couvre presque les premières phases. Par contre les mesures faites pour $\Delta = 18440$ km.* montrent qu'il s'agit bien d'une onde longitudinale. J'ai en effet obtenu les valeurs suivantes :

L	+4,59	—3,33	+5,2	+6,23
T	—0,15	+1,29	—0,66	—4,33
$\frac{L}{T}$	30	2,5	8,0	1,4
e	—82°	+63°,5	—71°	—31°

De même à $\Delta = 18660$ km., on peut observer l'arrivée d'une onde longitudinale correspondant au temps de propagation de S_cP_cP pour cette distance mais, contrairement à ce qui se passait dans le cas précédent, e est très faible, la composante verticale de cette onde étant pratiquement inexistante :

L	+2,5	—2,5	+5,0	—5,0
T	+0,9	—0,9	+0,7	+1,4
$\frac{L}{T}$	2,8	2,8	7,1	3,8
e	—2°	—2°	0°	—21°

Chaque fois que j'ai pu étudier S_cP_cP, il s'agissait d'une vibration de très petite amplitude, suffisante néanmoins pour prouver que c'est bien une onde longitudinale.

Onde S_cP_cS

1. *Azimut* $< 90°$.

Pas plus que S_cP_cP, S_cP_cS n'est une onde possédant beaucoup d'énergie au delà de distances épicentrales de 11600 km. environ. Pour $\Delta = 10050$ km., on obtient les valeurs suivantes relatives à S_cP_cS :

L	+0,35	+1,8	+0,6	+0,9
T	+2,26	—4,7	—4,1	—6,2
$\frac{L}{T}$	0,15	0,38	0,15	0,15
e	+31°	+16°	—31°	+19°

c'est donc bien une onde transversale.

Lorsque $\Delta = 11530$ km., S_cP_cS est assez faible, des mesures effectuées conduisent à :

L	+10,2	—23,5	+15,5	—6,9
T	+3,3	—0,95	—2,41	+6,8
$\frac{L}{T}$	3,1	24,7	6,4	1,0
e	+21°	0°	—15°	+12°,5

La valeur $\frac{L}{T} = 1$ est probablement due à l'onde S_cP_cS, mais celle-ci semble à peu près étouffée par les ondes longitudinales.

Lorsque $\Delta = 16760$ km.*, S_cP_cS, d'après l'hodochrone, doit arriver 2^s avant PR_2. Pour cette région on a :

L	—16,4	+26,6	—18,5	+15,1	—10,8
T	0	—3,8	+2,8	—3,6	+7,1
$\frac{L}{T}$	∞	7,0	6,6	4,2	1,5
e	+57°	—60°,5	+61°	—41°	—17°

Aucune mesure ne prouve la présence de S_cP_cS. Il semble que l'onde PR_2 soit plus forte et qu'elle couvre l'autre.

Au contraire pour les distances de l'ordre de 18000 km., S_cP_cS est mieux visible sur les inscriptions, tout en restant faible et en n'étant nettement transversale qu'en très peu de points.

Ainsi lorsque $\Delta = 18410$ km. :

L	+9,4	+7,3	—9,7	—17,1	—0,1	+13,2	+7,1
T	—4,7	+2,5	—0,1	—2,3	—4,8	—3,5	+7,9
$\frac{L}{T}$	2,0	2,9	97	7,5	0,02	3,8	0,9
e	0°	+55°	—62°,5	—71°,5	+83°	+70°	—10°

L	—3,5	—10,1	+4,1	—0,3
T	+3,6	—9,9	+11,0	—9,7
$\frac{L}{T}$	1,0	1,0	0,37	0,03
e	—85°	+67°	—58°	+53°

Lorsque $\Delta = 18440$ km.* :

L	+24,46	—7,0	—2,7	—2,9	+4,5	+8,8
T	—3,0	+2,0	—8,7	+5,6	+4,1	+4,0
$\frac{L}{T}$	8,1	3,5	0,31	0,52	1,1	2,2
e	—30°,5	0°	—76°	—50°	+53°,5	—33°

L	—6,8	+0,2
T	+2,9	—4,8
$\frac{L}{T}$	2,37	0,04
e	+55°,5	+23°

$\Delta = 18660$ km. : la composante EW est particulièrement faible :

L	+8,4	—4,4	+6,8
T	+6,4	—6,5	—0,7
$\frac{L}{T}$	1,3	0,7	9,7
e	—2°	+3°	—4°

2. *Azimut = 200° ; Δ = 12400 km.**

S_cP_cS arrive presque en même temps que PR_4. On peut donc prévoir immédiatement qu'elle sera peu marquée à côté d'une onde longitudinale intense ; c'est en effet ce que l'on constate :

L	+11,0	+4,0	+10,0	—8,9	+2,1
T	+2,4	—3,1	—0,37	—3,3	—5,8
$\frac{L}{T}$	4,5	1,3	27	2,7	0,37
e	—70°	+78°	—62°	+38°	—54°

Une seule mesure prouve la présence d'une onde transversale.

En résumé S_cP_cS pour toutes les distances épicentrales considérées a été trouvée comme étant bien une onde transversale, mais tellement faible que, chaque fois qu'elle arrive en même temps qu'une onde longitudinale, elle est à peu près couverte par celle-ci.

Onde $S_cP_cP_cS$

C'est l'onde S_cP_cP réfléchie une fois sur le noyau de la terre. Macelwane en donne l'hodochrone calculée pour les distances comprises entre 80° et 180°.

1. *Azimut < 90°.*

$\Delta = 11530$ km. ; les résultats ne peuvent pas être pris en considération, car l'onde transversale directe arrive presque à la même heure.

$\Delta = 12990$ km. On a :

L	+4,1	—2,4	+3,5	—2,4	+1,6	—3,4	+1,2
T	+0,6	+0,95	—3,7	+9,0	—7,1	+8,2	—9,5
$\frac{L}{T}$	6,8	2,5	0,95	0,27	0,23	0,41	0,13

Ces cinq mesures se rapportent à $S_cP_cP_cS$, mais alors cette onde arrive une minute plus tard que ne l'indique son hodochrone. Lorsque $\Delta = 16760$ km.*, on constate également des anomalies dans les temps de propagation ; $S_cP_cP_cS$ devrait arriver en même temps que PR_3, mais pour une minute auparavant on a les résultats :

L	—3,12	+2,8	—2,8	+ 0,06	—0,64	+3,68	+2,51
T	+7,9	—5,7	+3,9	+4,14	+2,27	+3,26	—2,97
$\frac{L}{T}$	0,40	0,49	0,56	0,014	0,028	1,13	0,81
e	+18°	+51°	—61°	+71°	—75°,5	+73°,5	—59°

L	—5,46	—3,8
T	+8,24	+6,1
$\frac{L}{T}$	0,66	0,62
e	+45°	+37°

Ces valeurs ne pouvant se rapporter qu'à l'onde transversale $S_cP_cP_cS$, il faudrait donc diminuer son temps de propagation de plus d'une minute.

On remarque la même anomalie pour des distances plus grandes. Lorsque $\Delta = 18410$ km., une onde transversale arrive une minute après PR_2 ; c'est probablement $S_cP_cP_cS$, car aucune autre onde transversale n'arriverait à cette heure, et inversement aucune mesure faite à une minute ultérieure ne laisserait supposer l'existence d'une onde transversale. Dans ce cas encore, elle arriverait presque deux minutes trop tôt.

Cette onde, dont la composante verticale est beaucoup plus grande que les composantes horizontales, conduit aux valeurs suivantes :

L	—2,5	+2,5	—2,5	+3,8	—17,7	—3,5	+2,2
T	—6,7	+6,7	—6,7	+8,2	—6,2	+5,5	—2,3
$\frac{L}{T}$	0,37	0,37	0,37	0,46	2,8	0,64	0,99
e	+55°,5	—70°	+69°	—70°	—59°	+82°	+85°

Pour $\Delta = 18440$ km.*, on ne peut tirer aucune conclusion des mesures, car elles seraient relatives à une minute partagée en deux par la fin de la ligne et ainsi le passage des composantes horizontales à la verticale ne comporterait aucune précision.

Lorsque $\Delta = 18660$ km., $S_cP_cP_cS$ paraît encore arriver une minute trop tôt ; là aussi, la composante verticale est grande :

L	—1,4	+2,1	—8,8
T	—2,5	+8,6	—5,2
$\frac{L}{T}$	0,5	0,2	1,7
e	—27°	—25°	—41°

2. *Azimut* = 200° ; Δ = *12400 km.**

Une onde transversale assez importante, les amplitudes totales mesurées atteignant 20 μ, arrive à l'heure théorique calculée de $S_cP_cP_cS$:

L	—3,86	+32,16	—10,79	+3,86	—7,33	+9,35
T	—8,02	+5,26	—11,38	+8,02	—12,50	+11,64
$\frac{L}{T}$	0,48	6,1	0,9	0,48	0,58	0,8
e	—29°	+15°	—39°	+59°	—27°,5	+14°

Contrairement à ce qui se passe pour les autres tremblements de terre étudiés, venant tous du Pacifique, dans ce cas l'élongation de la composante verticale est petite par rapport à celles des composantes horizontales.

En conclusion, il semble que cette onde $S_cP_cP_cS$ n'a pas les mêmes temps de propagation lorsqu'elle vient de l'océan Atlantique que lorsqu'elle vient du Pacifique. Dans le premier cas on observe toujours une diminution d'environ une minute par rapport aux durées calculées. Or les ondes ont cheminé sous le Pacifique et sous l'Asie, tandis que celles provenant des îles Sandwich se sont propagées sous l'Atlantique. Il n'est pas impossible que des différences de constitution puissent intervenir. Plusieurs auteurs ont trouvé des anomalies dans la propagation de $S_cP_cP_cS$. Cette onde a été étudiée en particulier par Jeffreys (10) *Macelwane* (16, 17), *Gutenberg et Richter* (8), *et on peut cons-*

tater des différences de 30 secondes entre les données de ces auteurs pour les distances comprises entre 15000 et 18000 km. Il n'est donc pas étonnant de trouver également des anomalies par la méthode de « recomposition ».

Onde PS_cP_cS

Son hodochrone n'est pas calculée pour des distances de l'ordre de 12000 km. Lorsque $\Delta = 16760$ km.*, les heures d'arrivée observées et calculées correspondent très bien entre elles :

L	+9,1	—6,1	—12,0
T	—24,0	+22,5	—10,2
$\frac{L}{T}$	0,38	0,27	1,17
e	—30°	+34°,5	—43°

Lorsque $\Delta = 18410$ km., on trouve une onde transversale correspondant sensiblement à l'heure d'arrivée calculée pour cette distance. La période change brusquement et passe de 18^s à 26^s. Cependant on ne trouve qu'en deux points des valeurs de $\frac{L}{T} < 1$, probablement parce que, PR'_3 arrivant en même temps, cette dernière onde est encore assez importante pour s'ajouter à la vibration transversale :

L	+32,3	+18,5	—3,0	—6,4
T	+14,2	+12,4	—14,5	—9,2
$\frac{L}{T}$	2,2	1,5	0,20	0,7
e	—24°	+27°	+31°	+22°

Pour $\Delta = 18440$ km.*, PS_cP_cS arrive une minute plus tôt que ne le fait prévoir son hodochrone théorique :

L	+3,3	—5,45	—7,66	+11,58	—15,1	+5,55
T	+16,0	—13,6	+13,3	+6,9	+6,7	—8,46
$\frac{L}{T}$	0,20	0,40	0,57	1,7	2,2	0,65
e	+28°,5	—50°,5	+25°	—21°,5	+30°,5	—47°

c'est une onde transversale bien caractérisée.

Lorsque $\Delta = 18660$ km., PS_cP_cS devrait arriver en même temps que d'autres ondes. Dans la région qui correspond à son heure d'arrivée théorique, $\frac{L}{T}$ devient un peu plus faible, mais n'atteint 0,9 que pour un seul point : on peut en conclure que cette onde transversale est très peu importante.

En résumé, PS_cP_cS, onde transversale, est plus faible que $S_cP_cP_cS$ et est en général très peu marquée sur les séismogrammes. De même que pour $S_cP_cP_cS$ il semble qu'il y ait des anomalies dans les durées de propagation, mais les observations ne sont pas suffisamment nombreuses ni précises pour qu'on puisse l'affirmer.

Onde $S_cP_cP_cS'$

C'est une onde analogue à $S_cP_cP_cS$ mais qui s'est réfléchie sur la face opposée du globe. Elle n'est pas encore visible sur les séismogrammes pour des distances de l'ordre de 16000 km.

Lorsque $\Delta = 16760$ km.*, on relève une seule mesure indiquant qu'on a affaire à une onde transversale qui correspond à l'heure d'arrivée théorique de $S_cP_cP_cS'$:

L	—14,6
T	—20,6
$\frac{L}{T}$	0,70
e	—35°,5

Toutes les autres mesures conduisent à des valeurs de $\frac{L}{T}$ supérieures à 1.

$\Delta = 18410$ km. ; deux valeurs peuvent correspondre soit à cette onde, soit à une onde transversale directe :

L	+0,5	+2,8
T	+8,4	17,5
$\frac{L}{T}$	0,03	0,24
e	—67°	—52°

Si ces vibrations appartiennent à $S_cP_cP_cS'$, le temps de pro-

pagation théorique de cette onde est trop long d'une minute.

$\Delta = 18440$ km.* : $S_cP_cP_cS'$ arrive en même temps que PR_4, une seule mesure paraît lui correspondre, tous les autres rapports trouvés sont plus grands que 1. Cette onde a encore une avance de 30^s sur son temps de propagation calculé.

Lorsque $\Delta = 18660$ km., elle doit arriver parmi un grand nombre d'ondes longitudinales et transversales dont les courbes hodochrones sont mal définies et on ne peut la séparer de ces dernières.

En résumé, l'onde $S_cP_cP_cS'$, invisible pour les distances voisines de 12000 km., est probablement très faible lorsque Δ atteint 17 à 18000 km., car elle n'est en général marquée que par une ou deux mesures positives. On peut cependant s'apercevoir que, comme pour toutes les autres ondes complexes, ici encore il faut compter avec des anomalies dans les temps de propagation.

CONCLUSION

De toutes les mesures faites, il résulte que la plupart des ondes pour lesquelles Macelwane donne les durées de propagation dans ses tables (18) peuvent être mises en évidence sur les séismogrammes par cette méthode d'analyse des vibrations. Un certain nombre d'autres ondes sont encore citées dans ces tables, mais elles sont trop faibles et ont des temps de propagation trop rapprochés aux distances envisagées pour qu'on puisse les étudier.

J'ai toujours pu mettre en évidence, lorsqu'il s'agissait d'ondes longitudinales, que le vecteur-amplitude est dirigé dans le sens de la propagation du rayon séismique (en tenant évidemment compte des approximations dans les mesures). Au contraire dans le cas des ondes transversales, j'ai observé une rotation de ce vecteur qui se place à peu près perpendiculairement à la direction de propagation.

Cependant par cette méthode j'ai pu m'apercevoir qu'il n'y a pas toujours accord entre les temps de propagation calculés et observés. Ce fait est le plus apparent dans le cas des ondes transversales où l'on trouve des anomalies atteignant une à deux minutes. Il l'est moins pour les ondes longitudinales. Cette variation du temps de propagation est surtout nette pour $S_cP_cP_cS$, qui arrive régulièrement environ une à deux minutes trop tôt lorsque Δ est de l'ordre de 17000 km.

III

REMARQUES

A côté de ces ondes connues, les calculs m'ont permis de trouver d'autres vibrations transversales ne correspondant à aucune courbe de propagation publiée ou connue.

a) Pour la distance épicentrale de 11530 km., on remarque une onde transversale très importante, arrivant plus tard que que SR_3, mais 6^m plus tôt que les premières longues ondes.

L	+3,1	+6,3	—6,1	—9,4	+12,2	—17,3	—5,5
T	—9,3	—38,0	+18,2	+21,7	—28,6	+10,7	—25,4
$\frac{L}{T}$	0,33	0,16	0,33	0,43	0,43	1,6	0,22
e	+50°,5	—15°	—21°,5	+20°,5	+9°	—14°	+26°

Il est possible que cette onde fasse partie des longues ondes ou en soit le précurseur.

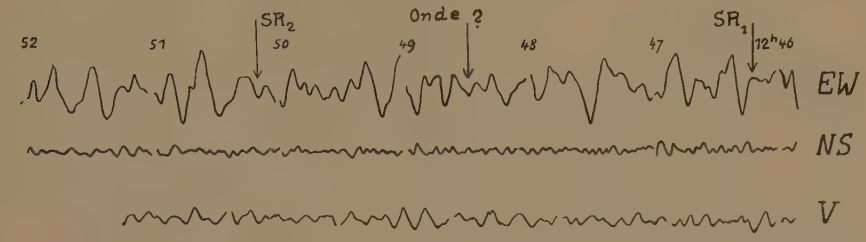
b) Pour $\Delta = 18440$ km.* et presque en même temps que $S_cP_cP_cS$, une onde transversale apparaît entre PR_2 et PR_3. Cependant les observations ne sont pas assez nombreuses pour qu'on puisse en déduire s'il s'agit d'une onde distincte ou si elle fait encore partie du train d'ondes $S_cP_cP_cS$. On a :

L	—6,97	+17,39	—4,82	+2,72	—3,62	—1,82	—5,23
T	—11,35	—5,0	+12,25	—9,96	+13,3	—10,32	+10,64
$\frac{L}{T}$	0,61	3,08	0,39	0,27	0,27	0,17	0,49
e	+60°	+56°,5	—38°,5	+55°,5	—32°	—27°,5	+52°,5

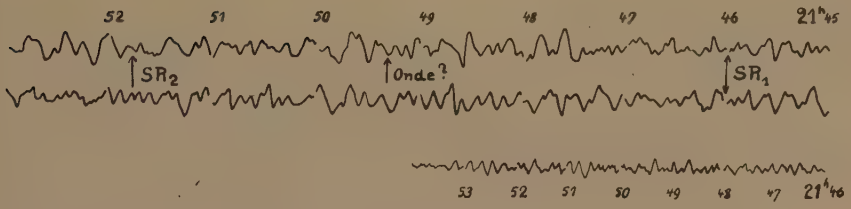
c) Outre ces ondes, dont chacune nécessiterait des recherches plus approfondies, j'ai pu en suivre une autre pour des distances épicentrales variant entre 10200 km. ou 91°,8 et 18900 km. ou 170°,1.

Elle a une forme très caractéristique (fig. 6) et est visible sur tous les séismogrammes que j'ai eus entre les mains, séismogrammes provenant de stations diverses. En me ba-

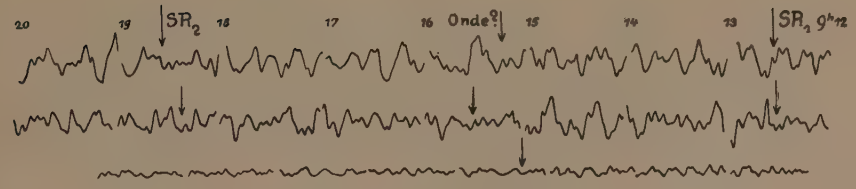
sant uniquement sur les durées de propagation et sur la détermination de l'impétus, sans tenir compte de la direction



a) Séisme du 13 novembre 1925 : $\Delta = 97°,1$.



b) Séisme du 2 novembre 1923 : $\Delta = 127°,4$.



c) Séisme du 12 avril 1926 : $\Delta = 136°,6$.

Fig. 6.

de vibration, j'ai tout d'abord déterminé empiriquement son hodochrone. Les observations relatives à cette onde sont résumées dans le tableau suivant :

Date du séisme	Station	Épicentre	Δ km.	Temps de propagation m. s.	Période Tp sec	Vitesse (calculée) en km.	Longueur d'onde km.	Remarques
13 avr. 1927	St.	Philippines, côte W de Luçon	91°,8	32 05	9	5,29	63,5	
3 mai 1925	»	34°,0 S, 57°,0 E	93°,5	32 28	10	—	—	entre SR_1 et SR_2
13 nov. 1925	»	Philippines, 13°,0 N, 124°,7 E	97°,1	33 42	12	5,33	66,62	
5 mai 1925	»	I. Negros, 9°,5 N, 123°,0 E	98°,9	34 36	11	5,29	58,2	id.
13 juin 1929	»	13° N, 127° E	100°,1	49	—	—	—	
16 nov. 1927	»	I. Sangi, 7°,0 N, 126°,0 E	102°,7	35 35	7	5,35	37,45	2 m. 12 s. après PPSS
19 avr. 1923	»	2°,5 N, 118°,5 E	105°,2	36 20	—	5,36	—	
14 nov. 1927	»	Océanie, 30°,2 S, 71°,0 W	105°,4	17	9,5	5,37	37,60	
3 mai 1925	»	SE Mindanao 2° S, 127°,7 E	106°,7	39	—	5,39	80,85	2 m. 37 s. après SPS
27 juin 1929	»	I. Sandwich, 54°,0 S, 29°,6 W	109°,5	37 23	—	5,44	—	
10 août 1927	»	Nouvelle-Guinée, 0°,5 N, 130°,0 E	110°,3	13	15	5,52	82,80	1 m. 32 s. après PPS, 51 s. avant ScPcPcS
3 août 1926	»	I. Carolines, 2°,0 S, 127°,3 E	110°,6	36 06 (?)	10	5,32	53,20	très mauvais sismogramme
2 nov. 1923	»	5°,7 S, 151°,8 E	127°,4	41 21	15	5,70	85,50	59 s. après PR'_3
27 mars 1926	»	I. Salomon, 9°,5 S, 157°,0 E	133°,2	57	17	5,89	103,07	3 m. 07 s. avant PSSS
25 janv. 1926	»	I. Salomon, 9° S, 159°,5 E	133°,9	42 04	14	5,81	72,6	
16 sept. 1926	»	Océanie, 10°,7 S, 159°,7 E	135°,5	06	—		—	4 s. après PR'_4
12 avr. 1926	»	I. Salomon, 11°,2 S, 161°,2 E	136°,6	43 06	22	5,74	103,32	
12 août 1922	»	Nouvelle-Calédonie, 22°,0 S, 170° E	149°,9	46 40	12	5,94	71,28	
24 juill. 1924	»	Nouvelle-Zélande, 48°,0 S, 159°,0 E	161°,0	47 30	12	6,3	75,6	
16 juin 1929	Uccle	Nouvelle-Zélande, 41°,9 S, 172°,5 E	167°56'	48 40	28	—	—	
»	St.		170°,1	18	23	6,41	150	

L'hodochrone empirique de cette courbe se place entre celles de SR_1 et de SR_2 (fig. 7). J'ai d'ailleurs reporté ces mêmes données sur un graphique publié par Gutenberg et Richter (8) ; on constate qu'elle arrive dans une région où aucune vibration nouvelle n'est prévue par ces auteurs (fig. 8).

En me servant de cette courbe hodochrone, j'ai essayé de retrouver l'onde sur les séismogrammes qui m'ont servi dans ce travail, en essayant de déterminer par la méthode de recomposition quelle était sa direction de vibration.

1. *Azimut* $< 90°$.

$\Delta = 11530$ km. : elle est assez mal visible entre SR_1 et SR_2 et se manifeste par deux $\frac{L}{T} < 1$, mais ne possède pas d'impétus net :

L	—7,8	+9,4	—10,1	+0,65
T	+13,4	—4,9	—4,8	—10,9
$\frac{L}{T}$	0,58	1,9	2,1	0,06
e	—7°,5	+24°	—21°	—7°,5

Si c'est une onde transversale et si l'on se base sur ces données, on est conduit à admettre un temps de propagation d'environ 36 minutes.

$\Delta = 16760$ km.* : on la retrouve encore entre SR_1 et SR_2 avec un temps de propagation d'environ 46 minutes. Les mesures sont peu précises car l'impétus se trouve à la fin d'une ligne, mais l'onde semble encore être transversale :

L	—10,0	—4,9	—30,6
T	—7,0	+19,7	+29,4
$\frac{L}{T}$	1,43	0,25	1,04
e	+57°	+35°,5	—34°,5

$\Delta = 18410$ km. : un grand nombre de mesures indiquent la présence d'une onde transversale importante, mais pour cette distance SR'_1 ($\Delta > 180°$) aurait sensiblement la même durée de propagation.

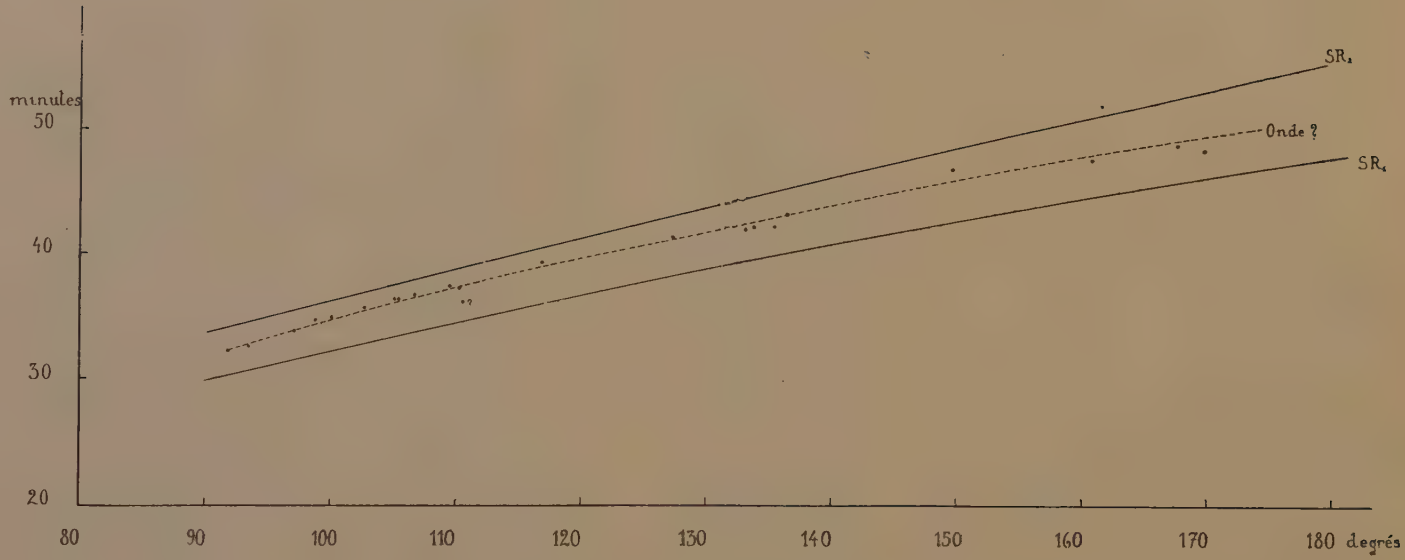


Fig. 7. — Courbes hodochrones de SR_1 et SR_2 pour les distances comprises entre 90° et 180° et hodochrone observé de l'onde.

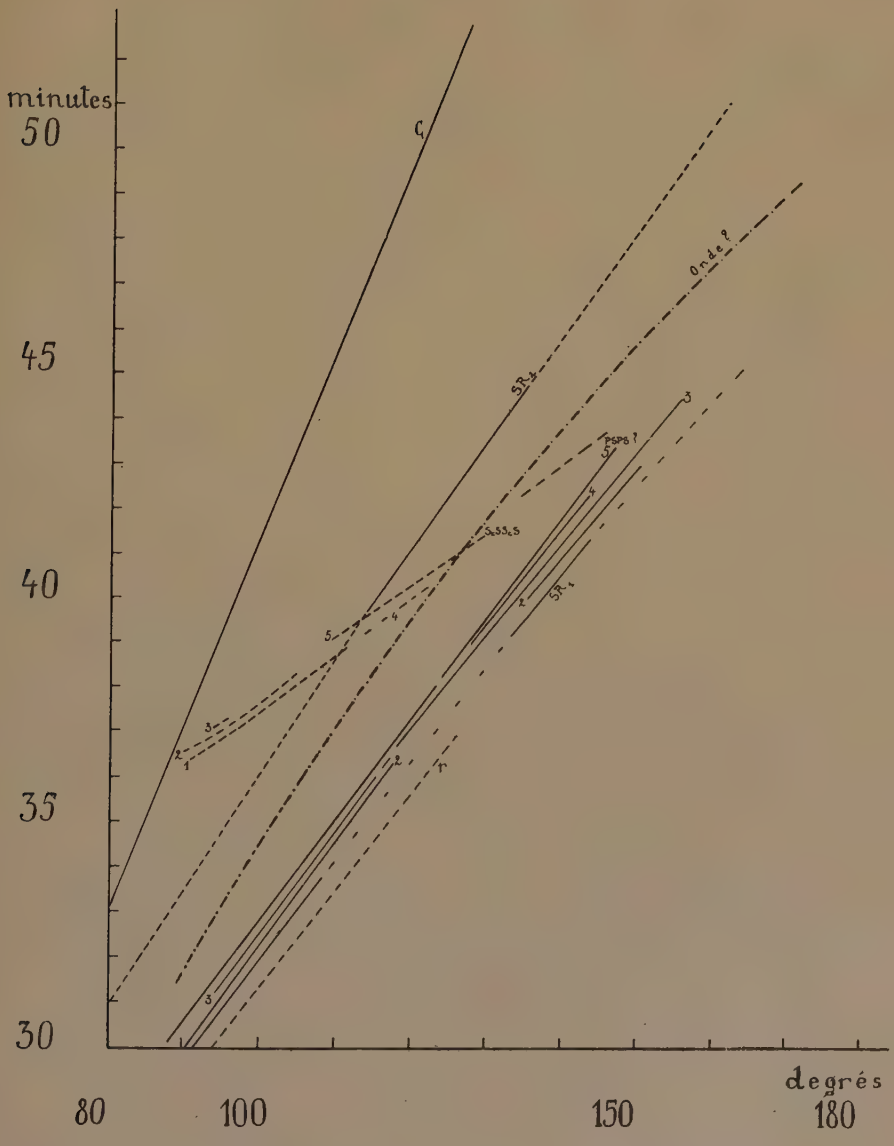


Fig. 8. — Courbes hodochrones observées (d'après Gutenberg et Richter).
En trait interrompu : courbe de l'onde ?

$\Delta = 18440$ km.* : cette onde est bien visible sur la composante EW et NS. Pour la région correspondante, on relève :

L	+76,96	+15,64	+25,83	—20,61	+5,79	—61,18
T	—4,3	—43,92	—51,82	+65,09	+36,11	+38,94
$\frac{L}{T}$	1,8	0,36	0,50	0,32	0,16	1,6
e	—6°	+24°	—5°	+8°	+29°	—24°

Le résultat est évidemment douteux, car là encore SR'_1 peut être assez important.

$\Delta = 18660$ km. : pour la minute correspondant à l'heure d'arrivée calculée de cette onde, on obtient les valeurs :

L	—45,8	+30,2	—58,9	+57,6	—90,0
T	+41,0	+32,4	+61,9	+4,5	+47,1
$\frac{L}{T}$	1,1	0,9	0,9	13	1,9
e	—31°	—48°	+53°	—50°	+21°

2. *Azimut* = *200°* ; Δ = *12400 km.**

Pour cette distance également, les résultats sont douteux et l'on ne peut pas affirmer que l'onde soit transversale car, quoique quatre mesures indiquent la présence d'une telle vibration, elles peuvent très bien se rapporter à $S_cP_cP_cS'$, qui arrive presque en même temps.

Les résultats ne sont pas suffisamment probants ni nombreux pour qu'on puisse tirer une conclusion au sujet de la direction de vibration de cette onde. Le fait que sa courbe hodochrone empirique est sensiblement parallèle à celles de SR_1 et SR_2 laisse supposer qu'il s'agirait d'une onde analogue à celles-ci, mais qui aurait subi des réflexions sur une couche de discontinuité interne du globe ; par exemple une onde analogue à SR_3, mais dont les points de réflexion ne se trouveraient pas à la surface du globe.

RECHERCHE D'UN MEILLEUR PROCÉDÉ D'INSCRIPTION DES TREMBLEMENTS DE TERRE

J'ai indiqué au début combien il était nécessaire, pour l'étude de la direction de vibration des ondes séismiques, d'avoir à sa disposition des séismogrammes purs possédant des impétus nets et non perturbés par l'agitation microséismique. La station séismologique de Strasbourg a une situation particulièrement défavorable en ce sens que l'agitation microséismique y est souvent très forte et complique l'étude des séismes. Je me suis proposé de rechercher quelles seraient les conditions d'inscription les meilleures pour atténuer l'influence de cette perturbation. Or en comparant les séismogrammes relatifs à un même tremblement de terre, mais enregistrés par des appareils Galitzine de périodes différentes, on constate, comme il fallait bien s'y attendre d'après les conclusions de la théorie (3), que la pureté des inscriptions est étroitement liée à la période de l'instrument. Plus la période du séismographe est longue, plus celui-ci grandit les ondes de longue période, fréquentes dans les cas de tremblements de terre éloignés ; en même temps les oscillations plus rapides, gênantes au moment du dépouillement, sont fortement affaiblies, de même que l'agitation microséismique.

Pour étudier l'influence de cette agitation sur la forme des ondes enregistrées, j'ai réalisé les inscriptions suivantes à l'aide de l'appareil de synthèse des mouvements périodiques (22).

A) 1° la période T reste constante et égale à $14^s, 4$, période assez fréquente dans le cas des tremblements de terre ;

2° T_1 varie de $4^s, 6$ à $6^s, 6$, cette deuxième valeur étant voisine de celle de l'agitation microséismique.

B) Les périodes restent constantes, on augmente l'amplitude et on fait varier la différence de phase.

On constate immédiatement à quel point l'aspect des ondes résultantes varie avec l'importance de l'agitation microséismique (fig. 9).

Cette influence de l'agitation microséismique étant ainsi mise en évidence, il a paru intéressant, afin de pouvoir comparer leur fonctionnement, d'inscrire sur un même cylindre enregistreur les mouvements de deux séismographes Galitzine placés sur un même pilier et orientés parallèlement (EW), mais dont les périodes propres étaient 13^s et 22^s, 8.

Les constantes des deux appareils ont été :

	EW	EW
T_0	13,0	22,8
T_1	12,0	20,1
μ	—0,08	+0,03
$\frac{1}{C_1} = \frac{KA_1}{\pi I}$	245	75
$\log C_1$	$\bar{3},61083$	2,12476

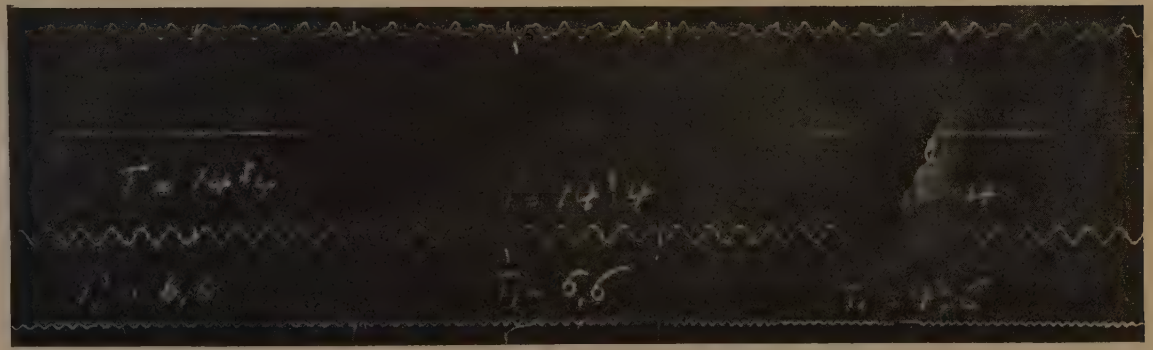
Les grandissements dynamiques sont donnés dans le tableau suivant. J'ai noté en dernière colonne la valeur de R, rapport des grandissements, tel que :

$$R = \frac{\text{Grandissement de l'appareil de } 12^s.}{\text{Grandissement de l'appareil de } 22^s.}$$

T_p	V_{12}	V_{22}	R
1	242	75	3,23
3	653	217	3,00
3,5	730	249	2,93
4	794	281	2,81
4,5	847	310	2,73
5	893	338	2,64
5,5	926	364	2,54
6	945	397	2,44
6,5	962	410	2,34
7	971	430	2,25
8	953	464	2,05
9	926	490	1,89
10	877	509	1,72
11	820	521	1,57

Fig. 9. — Composition de deux mouvements sinusoïdaux :

1) T reste constant (T = 14ˢ,4), T_1 varie de 4ˢ,6 à 6ˢ,6.



2) T et T_1 restent constants mais l'amplitude de l'une des composantes varie ainsi que la différence de phase.

T_p	V_{12}	V_{22}	R
12	769	526	1,46
13	705	525	1,34
14	646	520	1,24
15	592	512	1,15
16	541	499	1,08
17	493	484	1,01
18	448	469	0,95
19	410	451	0,90
20	374	432	0,86
25	238	339	0,70
30	157	258	0,60
40	76	150	0,50

Les courbes de grandissement sont portées en trait continu sur le graphique (fig. 10), ainsi que celle de R, qui part de 3,26 pour $T_p = 0$.

En effet $$V_{12} = \frac{1}{C_1} \frac{Tp}{(1+u_1^2)(1+u^2)\sqrt{1-\mu f(u)}}$$

$$V_{22} = \frac{1}{C'_1} \frac{Tp}{(1+u'^2_1)(1+u'^2)\sqrt{1-\mu' f(u')}}$$

$$\frac{V_{12}}{V_{22}} = \frac{C'_1 (1+u'^2_1)(1+u'^2)\sqrt{1-\mu' f(u')}}{C'_1 (1+u'^2_1)(1+u'^2)\sqrt{1-\mu f(u)}}$$

Lorsque T_p tend vers 0, les quantités u, u_1, u', u'_1, $f(u)$ et $f(u')$ tendent également vers 0 et le rapport des grandissements $\frac{V_{12}}{V_{22}}$ tend vers $\frac{C'_1}{C_1}$. A la limite :

$$\frac{V_{12}}{V_{22}} = \frac{C'_1}{C_1} = \frac{0{,}01332}{0{,}0408} = 3{,}26$$

Comparaison des inscriptions. — Pour comparer les inscriptions, j'ai déterminé les amplitudes des différentes ondes rigoureusement à la même heure sur les deux séismogrammes. Soient a l'amplitude réelle du sol, A_{12} et A_{22}, les élongations que l'on mesure sur les séismogrammes. Si les appareils sont également fidèles, le rapport R′, tel que :

$$R' = \frac{A_{12}}{A_{22}} = \frac{a \times V_{12}}{a \times V_{22}} = \frac{V_{12}}{V_{22}}$$

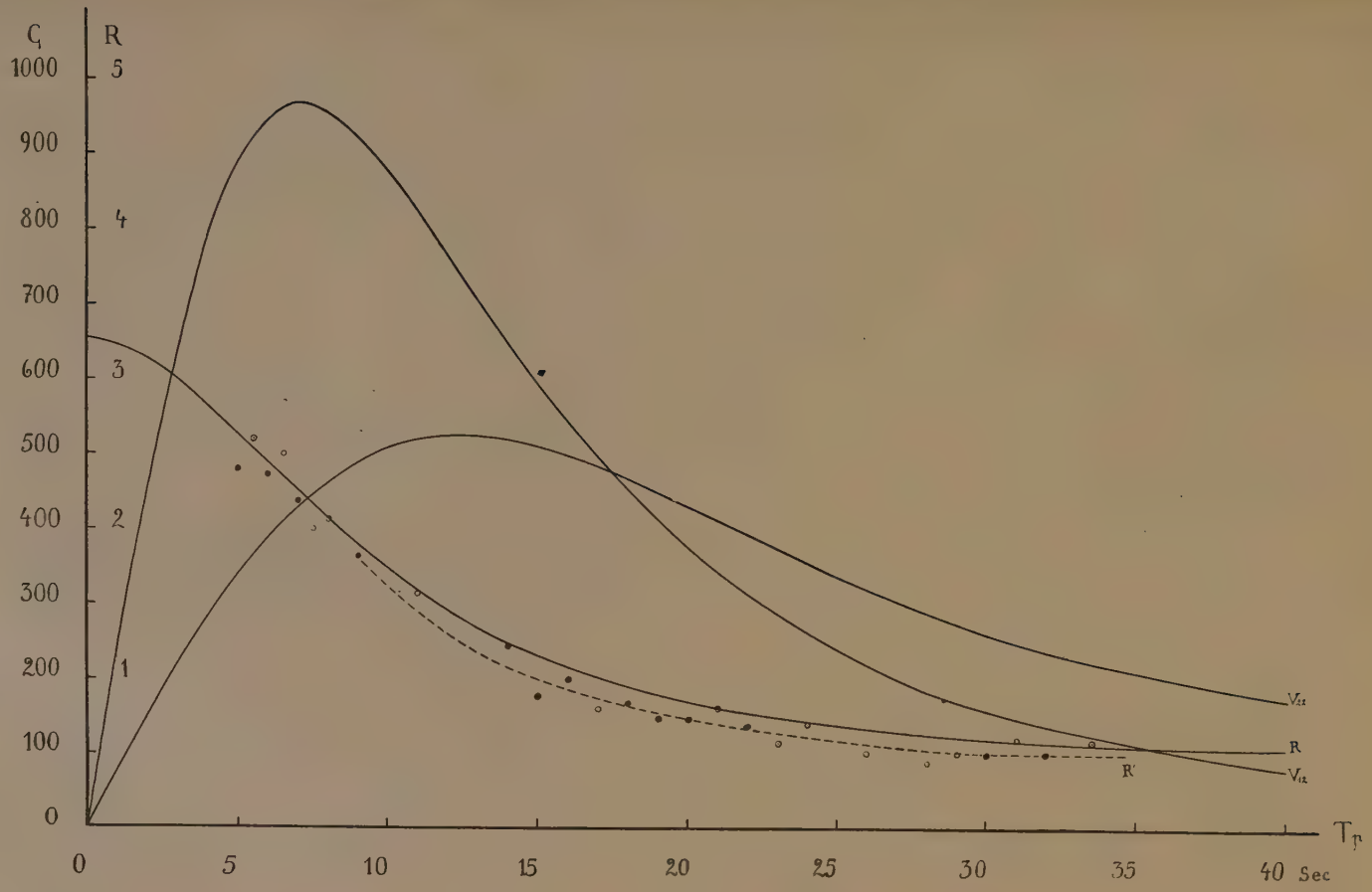


Fig. 10. — Courbes de V_{12}, V_{22} et R (en trait plein) et de R' (en pointillé).
Les points • proviennent de la moyenne de plusieurs observations, tandis que les autres ⊙ ne sont dus qu'à une seule observation.

doit être égal à R. Pour étudier le fonctionnement des deux appareils, il suffit par conséquent de comparer R′ à R. Au cours de ces mesures, il faut évidemment tenir compte du temps de relaxation ; les différences $\Delta\tau$ sont données en secondes dans le tableau suivant :

T_p	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\Delta\tau$	—	0,2	0,35	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,8	1,9	2,1	2,4	2,5

T_p	16	17	18	19	20	25	30	35	40
$\Delta\tau$	2,7	2,9	3,0	3,1	3,1	3,7	4,2	4,4	4,7

Il est facile de voir que les inscriptions fournies par les deux appareils, si elles diffèrent par l'amplitude des élongations,

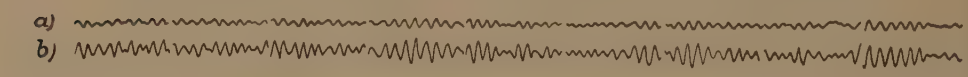


Fig. 11. — Agitation microséismique (8 décembre 1932).
a) 22 sec. b) 12 sec.

sont comparables en ce qui concerne la forme des courbes inscrites.

a) *Agitation microséismique.* — Les mesures ont été effectuées pour les journées des 7, 8, 10 décembre et du 3 janvier ; les moindres détails sont reproduits identiquement par les deux appareils (fig. 11). Le tableau suivant contient la moyenne des rapports R′, le rapport R correspondant, les chiffres de la dernière colonne représentant le nombre de mesures effectuées pour obtenir chaque moyenne :

T_p	R	R′	Nombre de mesures
5	2,64	2,48	7
5,5	2,54	2,6	3
6	2,37	2,40	22
6,5	2,34	2,5	1
7	2,25	2,24	15
7,5	2,15	2,0	1
8	2,05	2,03	16
9	1,89	1,90	6
10	1,72	1,8	2

On constate qu'il y a peu de différences entre R et R′.

b) *Tremblements de terre.* — J'ai ensuite comparé les inscriptions, fournies par les deux appareils, des tremblements de terre suivants :

		h. m. s.	km.	
11 décembre 1932		21 48 14		rapproché.
21	eP	6 22 25	8870 :	Nevada, San Francisco, 114°,5 W 38° N.
24	e	6 51		Longues ondes.
25	iP	2 14 42	6860	Chine.
31	iP	6 43 08	8940	

T_p	R	R'	Nombre de mesures
5	2,64	2,1	2
6	2,37	2,1	3
7	2,25	1,9	2
8	2,15	2,05	8
9	1,89	1,7	3
10	1,72	1,65	4
11	1,57	1,56	4
12	1,46	1,12	7
13	1,34	1,05	3
14	1,24	1,22	17
15	1,15	0,88	5
16	1,08	0,99	10
17	1,01	0,8	1
18	0,95	0,84	10
19	0,90	0,74	8
20	0,86	0,73	6
21	0,81	0,8	1
22	0,77	0,68	4
23	0,74	0,57	1
24	0,72	0,70	4
25	0,70	0,62	2
26	0,68	0,51	3
28	0,63	0,44	3
29	0,62	0,50	1
30	0,60	0,49	6
31	0,58	0,59	1
32	0,56	0,49	5
34	0,54	0,58	1

Comparons les valeurs obtenues pour l'agitation microséismique à celles obtenues au moment des tremblements :

T_p	R	$R'_{ag.}$	$R'_{trembl.}$
5	2,64	2,48	2,1
6	2,37	2,40	2,1
7	2,25	2,24	1,9
8	2,05	2,03	2,05
9	1,89	1,90	1,7
10	1,72	1,80	1,56

On trouve d'une manière générale que R' (agitation) se rapproche bien plus de R que R' (tremblement). Il semble que cela tienne avant tout aux difficultés de mesure. Dans le cas du mouvement microséismique, on a affaire à des ondes sinusoïdales très pures et de périodes parfaitement bien déterminées. Au contraire dans le cas d'un tremblement les différentes ondes qui se succèdent se perturbent mutuellement et rendent les mesures d'autant plus difficiles que leurs périodes sont plus courtes. Pour tracer la courbe de R', j'ai pris la moyenne générale de toutes les observations, à savoir :

T_p	R'
5	2,40
5,5	2,6
6	2,37
6,5	2,5
7	2,19
7,5	2,0
8	2,06
9	1,82
10	1,70

Si l'on trace la courbe moyenne, on s'aperçoit que jusqu'à des périodes du sol de 10^s, elle est pratiquement confondue avec celle de R. Au delà de cette période, elle descend nettement au-dessous de la courbe.

Cette divergence tient probablement au fait que l'on se trouve dans la région des maximums des courbes de grandissement, où les variations sont très rapides, et où une petite erreur dans la détermination des constantes peut beaucoup modifier les valeurs de V_{12} et V_{22}, et par suite celle de R.

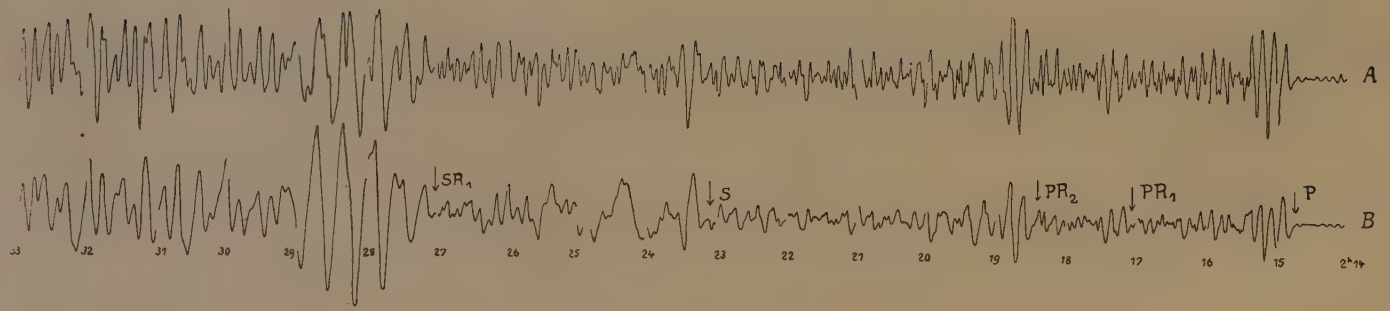


Fig. 12. — Tremblement de terre du 25 décembre 1932 (désert de Gobi).
a) Inscription EW 12 sec.
b) Inscription EW 22 sec.

Ces inscriptions ont permis de voir que l'agitation microséismique ressort moins sur les appareils de période 22s que sur les autres, et que les séismes sont mieux inscrits sur les appareils à période longue (fig. 12). *Nous avons ainsi été amenés à modifier la période des appareils horizontaux Galitzine de la station séismologique de Strasbourg et à porter leur période de 12s à 22s environ à partir du mois de novembre 1933.*

BIBLIOGRAPHIE

(1) Berlage (H. P.), *Das japanische Beben vom 1. September 1923 und die Frage der Herdtiefe* (Jahresbericht des Schweizerischen Erdbebendienstes, 1923).

— *Sur la profondeur de foyer d'un tremblement de terre déduite d'un séismogramme d'une station éloignée* (Publications du Bureau central international de séismologie, Série A, Travaux scientifiques, fasc. 1. Toulouse, 1924).

(2) Dammann (M^lle^ Y.), *Le tremblement de terre du Kan-sou (16 décembre 1920). Étude physique et mathématique de la propagation* (Thèse Strasbourg, 1927).

(3) Galitzine (B.), *Vorlesungen über Seismometrie. Deutsche Bearbeitung von O. Hecker* (Leipzig und Berlin, 1914).

(4) Geiger (L.) und Gutenberg (B.), *Ueber Erdbebenwellen VI* (Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, 1912).

(5) Günther (S.), *Handbuch der Geophysik* (Stuttgart, 1897).

(6) Gutenberg (B.), *Grundlagen der Erdbebenkunde* (Berlin, 1927).

(7) Gutenberg (B.), *Lehrbuch der Geophysik* (Berlin, 1929).

(8) Gutenberg (B.) and Richter (C. F.), *On seismic waves* (Gerlands Beiträge zur Geophysik, Bd. 43, Heft 1 /2. Leipzig, 1934).

(9) Imamura (A.), *The South Atlantic earthquake of June 27, 1929, as registered at Tokyo — an observation of rigid waves transmitted across the earth's inner core* (Proceedings of the Imperial Academy. Tokyo, 1932).

(10) Jeffreys (H.), *Final tables* (polycopiées, 1933). — (Temps donnés au 0,1 de seconde.)

(11) Kelvin (Lord) and Tait (P. G.), *Treatise of natural philosophy*, Part II (Cambridge, 1903).

(12) Klussmann (W.), *Ueber das Innere der Erde* (Beiträge zur Geophysik. Leipzig, 1915, XIV).

(13) Krumbach (G.), *Die Ausbreitung von Erdbebenwellen in grossen Herdentfernungen bei dem Südseebeben vom 26. Juni 1924* (Veröffentlichungen der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena, Heft 16a, 1934).

(14) Labrouste (H.), *Analyse des graphiques résultant de la superposition de sinusoïdes* (Extrait des Annales de l'Institut de Physique du Globe de Paris, t. VII, 1929).

(15) Lacoste (J.), *Tremblements de terre mexicains ; tremblement de terre du 14 janvier 1931* (Publications du Bureau central international de séismologie. Série B, Monographies, fasc. 5, 1933).

(16) Macelwane (J. B.), *Evidence furnished by the earthquake of June 26, 1924, for a sharply bounded and very rigid core in the earth* (Bulletin of the geological Society of America, March 27th, 1926).

(17) Macelwane (J. B.), *The South Pacific earthquake of June 26, 1924* (Gerlands Beiträge zur Geophysik, 28, 1930).

(18) Macelwane (J. B.), *A preliminary table of observed travel times of earthquake waves for distances between 10° and 180° applicable only to normal earthquakes* (polycopiée, Saint-Louis, Missouri, 1933).

(19) Marsh (E.), *The Constitution of the earth* (Gerlands Beiträge zur Geophysik, Bd. 42, Heft 4. Leipzig, 1934).

(20) Roess (M^lle J.), *Sur les ondes séismiques à travers le noyau terrestre* (Association française pour l'avancement des sciences. Congrès de Nancy, 1931).

(21) Rothé (E.) et Godron (H.), *Notice bibliographique et scientifique sur Alexis Perrey* (Mémoires de l'Académie des Sciences de Dijon, 1924).

(22) Rothé (E.) et Remy (A.), *Appareil de synthèse de mouvements périodiques* (Publications du Bureau central international de séismologie. Série A, Travaux scientifiques, fasc. 4. Paris, 1927).

(23) Rothé (E.), *Le tremblement de terre* (Paris, 1932).

(24) Rothé (E.), *Cours de géophysique* (recueilli par les étudiants).

(25) Rudzki (M. P.), *Physik der Erde* (Leipzig, 1911).

— *Theorie des physischen Zustandes der Erdkugel* (Bulletin international de l'Académie des Sciences. Cracovie, 1899).

(26) Scrase (F. J.), *The refracted waves from deep focus earthquakes* (Proceedings of the Royal Society, vol. 132. Londres, 1931).

(27) Stechschulte (V. E.), *The Japanese earthquake of March 29, 1928, and the problem of depth of focus* (Bulletin of the seismological Society of America, vol. 22, N. 2, 1932).

(28) Tammann (G.), *Zur Analyse des Erdinnern ;* 1. *Erdkörper, Zusammensetzung seiner verschiedenen Schichten* (Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, 1923) ; — 2. *Aufbau des Erdinnern aus verschiedenen Schichten* (Ibid., 1924).

(29) Tams (L.), *Die Seismizität des Südantillenbogens* (Zeitschrift für Geophysik, 1930, VI).

(30) Wiechert (E.) and Zoeppritz (K.), *Ueber Erdbebenwellen, I* (Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, 1907).

(31) Zoeppritz (K.), Geiger (L.) und Gutenberg (B.), *Ueber Erdbebenwellen, V* (Ibid, 1912).

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE THÈSE

Pages

Mesure du coefficient de restitution des roches 3

Résultats 11

Conclusion 37

Photographie des rebondissements successifs d'une bille d'acier sur une face polie d'une roche 41

Résultats obtenus 48

Conclusion 66

Bibliographie 67

DEUXIÈME THÈSE

Étude des ondes provenant de séismes éloignés. 71

Ondes étudiées 76

Tremblements de terre étudiés 82

Résultats 83

I. Ondes P et S et leurs dérivées 91

II. Ondes ayant traversé le noyau de la terre . . 118

Conclusion 127

III. Remarques 128

Recherche d'un meilleur procédé d'inscription des tremblements de terre 135

Bibliographie 146

IMPRIMERIE DAUPELEY-GOUVERNEUR, A NOGENT-LE-ROTROU. — 1935.

Vu et approuvé :

Strasbourg, le 31 mai 1935.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

E. Rothé.

Vu et permis d'imprimer :

Strasbourg, le 4 juin 1935.

Le Recteur de l'Académie,
Président du Conseil de l'Université,

J. Dresch.